

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Modelação tridimensional em SIG para avaliação do potencial solar fotovoltaico em meio urbano

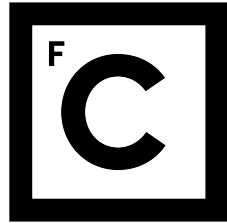
Miguel João Inácio dos Santos

**Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica
— Tecnologias e Aplicações**

Trabalho de projeto orientado por
Professora Doutora Cristina Maria Sousa Catita e
Professora Doutora Paula Maria Ferreira de Sousa Cruz Redweik

2016

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Ciências
ULisboa

Modelação tridimensional em SIG para avaliação do potencial solar fotovoltaico em meio urbano

Miguel João Inácio dos Santos

Trabalho de projeto orientado por
Professora Doutora Cristina Maria Sousa Catita e
Professora Doutora Paula Maria Ferreira de Sousa Cruz Redweik

2016

Agradecimentos

O desenvolvimento de um trabalho de projeto e de escrita da correspondente dissertação, sendo um trabalho necessariamente solitário só é possível com a colaboração e disponibilidade de vários intervenientes. Assim, são devidos agradecimentos àqueles que contribuíram para que este trabalho fosse possível.

Às orientadoras deste trabalho, professoras Cristina Catita e Paula Redweik, desde logo pelo desafio que propuseram e por todo o acompanhamento que souberam dar, pelo rigor científico que imprimiram à construção do trabalho e, num plano prático, por terem disponibilizado os dados e os meios materiais (um espaço para trabalhar) sem os quais este trabalho não existiria.

Aos colegas do curso de mestrado e a outros que foram companhia na FCUL e ajudaram a que tudo se concretizasse: Romeu, Gradiz, Adro, Carolina, Duarte, Ion, Ferreira, Inês. Ao Luís G. Ferreira pelas longas discussões e sugestões de \LaTeX . Для моих коллег Дэбора и Сара, спасибо большое за дух товарищества.

A todos aqueles cujas sugestões foram relevantes para levar avante a tarefa de concluir o trabalho.

Aos meus pais, por todo o resto.

Resumo

No contexto das agendas políticas atuais, moldadas pela emergência das alterações climáticas, o aproveitamento de fontes renováveis de energia é cada vez mais premente, e em meio urbano procuram-se soluções energéticas de aumento de eficiência no consumo, ou de microprodução. Os sistemas de informação geográfica (SIG) 3D tem tido um grande desenvolvimento nos últimos anos, permitindo criar modelos que representam com razoável grau de realismo áreas urbanas consideráveis, tendo um vasto campo de aplicação, nomeadamente em ferramentas de simulação de fenómenos naturais. Nesta dissertação, resultante de um trabalho de projeto, faz-se um levantamento dos diferentes meios de representação tridimensional em meio SIG e dos respetivos modelos de dados e propõe-se uma metodologia de geração automática (supervisada) de modelos de edifícios, com discretização de células individuais de fachadas/telhados, que permitem analisar a informação sobre radiação solar para um dado período astronómico (dia do ano/hora) proveniente de processamento prévio pelo algoritmo SOL (Redweik et al., 2013), segundo um modelo de dados predeterminado. Utilizando as capacidades de modelação procedimental disponíveis no *software* SIG atual, foi construído um modelo de uma área da cidade de Lisboa, que é disponibilizado através da *web* e permite a consulta de informação sobre radiação solar nas faces de um edifício, ao nível de desagregação de células de 1m² e foram analisadas alternativas possíveis a esta metodologia.

Este trabalho integra-se no desenvolvimento do projeto PVCITY – Potencial solar em ambiente urbano (ref^a PTDC/EMS-ENE/4525/2014, Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, FP (FFC/FC/ULisboa)).

Palavras-chave: Sistemas de informação geográfica, modelos 3D urbanos, visualização *web*, potencial solar fotovoltaico, modelos de dados espaciais

Abstract

Current political agendas are, to a relevant degree, shaped by the emergency of climate change, prompting the development of renewable sources of primary energy, especially in urban landscapes, where most of the energy consumption is located. Thus, new energy solutions for enhancing energy efficiency are required, whether enhancing energy efficiency or providing microgeneration of electricity. Recent developments in the field of 3D geographic information systems (GIS) have allowed the modelling of large urban areas with very high degrees of visual realism, and have a broad range of use cases, especially in the simulation of natural phenomena. This thesis, which describes the development of a project work, reviews the available models for representing 3D models in GIS and respective data models, and presents a methodology for the automatic generation (supervised) of building models, including the discretization of a building's faces (façades/roofs) into individual cells, which allow for the fine analysis of solar radiation for a given astronomical period (day of the year/time) provided by the SOL algorithm (Redweik et al., 2013) and following a predesigned data model. Making use of the procedural modelling features of current GIS software, an experimental model of a area of the city of Lisbon was generated and published via a web platform. This model allows the user to find information about solar radiation in a building's faces, with a resolution of 1m^2 . Additionally, the challenges and alternatives to the presented methodology are discussed.

Keywords: 3D geographic information systems, 3D urban models, web GIS visualization, photovoltaic potential, spatial data models.

Conteúdo

Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de siglas e abreviaturas	xv
Notas prévias	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Contribuição científica	3
1.5 Estado da arte	4
1.5.1 Aplicações dos SIG 3D	5
1.5.2 Modelos de dados	6
1.5.3 Geração de modelos	8
1.5.4 Algoritmos de cálculo de potencial solar em 3D	10
1.6 O algoritmo SOL	11
2 Metodologia	15
2.1 Modelo de dados	16
2.1.1 Condições de utilização	17
2.1.2 Saída de dados	17
2.2 Arquitetura do sistema	18
2.2.1 Regras CGA	19
2.2.2 Plataforma <i>web</i>	20
2.3 Especificação do processo	21
2.3.1 Criação de tarefa	23
3 Desenvolvimento de procedimento de modelação e publicação <i>web</i>	25
3.1 Estudo de caso	25
3.1.1 Fontes de dados	27

3.2	Processos e produtos	27
3.2.1	Preparação dos dados	27
3.2.2	Geração de modelos	28
3.2.3	Aplicação de atributos	29
3.2.4	Exportação	30
3.2.5	Erros de análise	31
3.3	Visualização e publicação de informação	32
4	Análise de resultados e alternativas	35
4.1	Comportamento de visualização	35
4.2	Alternativas	36
4.2.1	Representação de informação em ambiente <i>desktop</i>	36
4.2.2	Visualização <i>web</i>	38
5	Conclusões	41
5.1	Perspetivas de desenvolvimento	42
	Bibliografia	43
A	Anexos	49
A.1	Código-fonte das regras CGA	49
A.1.1	facades.cga	49
A.1.2	buildings.cga	50
A.1.3	roofs.cga	50
A.1.4	Anexos digitais	51

Lista de Figuras

1.1	Aplicações possíveis para os modelos 3D urbanos	5
1.2	Classes de aplicação do modelo CityGML.	7
1.3	Modelo geral IFC.	8
1.4	Níveis de detalhe segundo a especificação CityGML	9
1.5	Modos de Modelação	11
1.6	Processo de cálculo de radiação em fachadas verticais no algoritmo SOL	13
1.7	Ficheiro de texto de saída do algoritmo SOL	13
2.1	Diagrama do processo	15
2.2	Modelo de dados proposto	16
2.3	Ferramentas utilizadas no processo	19
2.4	Características de uma <i>shape</i>	20
2.5	Etapas do processo de modelação	21
2.6	Interface geral de uma tarefa em ArcGIS Pro	23
3.1	Aspeto geral da cena 3D	25
3.2	Área de estudo	26
3.3	Área a modelar em 3D, com elementos de fachada/telhado	26
3.4	Exemplo de modelos (fachadas divididas) em CityEngine	27
3.5	Diagrama do processo da regras CGA	28
3.6	Geração de edifícios e posterior divisão em células em CityEngine	28
3.7	Modelo da camada Fachadas com células individuais	29
3.8	Modelos 3D de edifícios completos	30
3.9	Tabela de atributos dos modelos 3D, divididos em células, com valores de radiação individuais	31
3.10	Discrepância entre planos dos pontos SOL e dos modelos 3D	32
3.11	Aspeto geral da cena <i>web</i> publicada, com os modelos visíveis	33
4.1	Seleção de um edifício (completo) individual	35
4.2	<i>Widget</i> /caixa de pesquisa	36
4.3	Pontos calculados pela <i>3D Fences Toolbox</i>	37
4.4	Edifícios da área de estudo visualizados em 3D no Google Earth	38
4.5	Edifícios da plataforma OSM visualizados em 3D num <i>browser</i> (Mapbox, 2016)	39

Lista de Tabelas

1.1	Definição dos níveis de detalhe em CityGML	10
3.1	Fontes de dados	27

Lista de siglas e abreviaturas

2D	duas dimensões / bidimensional
3D	três dimensões / tridimensional
ADE	<i>Application Domain Extension</i>
API	<i>application programming interface</i>
ASC	<i>ASCII text file</i>
BIM	<i>building information model</i>
CAD	<i>computer-aided design</i>
CIGeoE	Centro de Informação Geoespacial do Exército
CityGML	<i>City Geography Markup Language</i>
CGA	<i>Computer Generated Architecture</i>
CML	Câmara Municipal de Lisboa
EBK	<i>Empirical Bayesian Kriging</i>
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute, Inc.</i>
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
EVRS	<i>European Vertical Reference System</i>
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
LiDAR	<i>light detection and ranging</i>
LoD	<i>level of detail</i>
MDS	modelo digital de superfície
MDT	modelo digital de terreno

NMM	nível médio do mar
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i>
OMT-G	<i>Object Modelling Technique for Geographic Applications</i>
OSM	<i>OpenStreetMap</i>
SGBD	sistema(s) de gestão de base de dados
SIG	sistema(s) de informação geográfica
SRC	sistema de referência de coordenadas
SVF	<i>sky view factor</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
WMS	<i>Web Map Service</i>
WYSIWYG	<i>what you see is what you get</i>

Notas prévias

Estrutura da dissertação

Esta dissertação desenvolve-se em cinco capítulos principais: No capítulo *1 Introdução* são apresentados a motivação e objetivos do trabalho, além do levantamento do estado da arte nesta matéria, incluindo o algoritmo cujos dados de saída são base do procedimento desenvolvido.

No capítulo *2 Metodologia* é descrita a metodologia escolhida, com o modelo de dados proposto e a arquitetura geral do procedimento e ferramentas necessárias.

O capítulo *3 Desenvolvimento de procedimento de modelação e publicação web* detalha a aplicação do procedimento utilizado aplicado a um caso particular (referido na secção 1.3 Objetivos) de uma área urbana, sendo descrito o processo de construção do modelo SIG tridimensional que lhe está subjacente. É também descrito o procedimento de publicação da informação e interação do ponto de vista de um utilizador.

No capítulo *4 Análise de resultados e alternativas* descreve os resultados obtidos e são analisadas potenciais alternativas de processo de construção, e métodos de publicação de informação.

Por fim apresenta-se o capítulo *5 Conclusões*, onde se inclui um balanço crítico do trabalho, além de se projetarem possíveis linhas de desenvolvimento futuro.

Outras notas

- A especificação e descrição dos ficheiros produzidos no contexto deste trabalho é feita em inglês.
- Os ficheiros de dados e *websites* resultantes do trabalho descrito nesta dissertação, por serem objeto de permanente atualização, estão centralizados numa única página de referência desta dissertação, disponível até setembro de 2017 em www.msdm.eu.
- A cartografia apresentada utiliza o SRC ETRS89/PT-TM06 (código EPSG: 3763), podendo contudo ser mostradas grelhas de coordenadas geodésicas WGS84 (código EPSG: 4326).

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas são uma parte eminentemente relevante da agenda política, e a mitigação destas alterações tem assumido algum protagonismo na política internacional, como é exemplo a relevante Cimeira de Paris (2015), em que foi adotado por um grande número de países o Acordo de Paris (UNFCCC. Conference of the Parties (COP), 2015). Este acordo, além de reconhecer a necessidade de ação, prescreve alguns princípios de atuação para os estados-membros da ONU, tendo em conta o diagnóstico do potencial efeito irreversível das alterações climáticas. É nesta perspetiva ambiental, para além dos considerandos económicos, que se inserem as políticas de incentivo à produção energética a partir de fontes renováveis, assumida há vários anos por vários países, e particularmente relevante na Europa.

A diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu (Parlamento Europeu, 2009) estabelece como objetivo obrigatório que no consumo energético comunitário global uma quota de 20% de energia seja proveniente de fontes renováveis até 2020. No caso português esta diretiva é o *Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis*, que define como objetivo que 60% da produção de eletricidade tenha origem em fontes renováveis. Um dos eixos desta política, a par de grandes empreendimentos de produção e equipamento da rede elétrica, é a aposta na microprodução de energia solar, de modo a diversificar o *mix* energético. Assim, a microprodução solar fotovoltaica revela-se de grande importância a médio prazo, pelo que o estudo do potencial desta forma de aproveitamento energético será de grande utilidade como ferramenta de planeamento quer para a decisão política, quer para os diversos agentes da sociedade.

1.2 Motivação

É no contexto da referida política de aproveitamento energético de fontes renováveis que se inserem o Decreto-Lei nº78/2006, que estabelece as bases do *Sistema Nacional de Classificação Energética* e o *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (Diário da República, 2006), resultantes da transposição da Directiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Estes documentos detalham alguns sistemas e dispositivos construtivos (passivos e ativos) que podem ser aplicados a um edifício, com o fim de melhorar a sua eficiência energética, o que se pode também traduzir em autossuficiência energética em alguns casos.

Neste sentido importa cada vez mais aumentar a capacidade de avaliação do potencial energético dos

edifícios, não apenas de construção nova como de edificado existente. No caso particular das cidades a exposição solar é o aspeto mais relevante, tanto do ponto de vista do conforto térmico, como pelo potencial de aproveitamento para produção de energia (térmica ou elétrica). Os critérios de avaliação dos imóveis, como os previstos no *Código do Imposto Municipal sobre Imóveis* (Autoridade Tributária e Aduaneira, 2016, Artigo 43º) são alvo de crescente discussão, ao incorporarem dimensões diversas, pelo que também neste campo importa aumentar a quantidade e fiabilidade da informação.

Considere-se ainda a utilidade dos modelos 3D aquando da fase de projeto de edifícios e outras construções, como importante ferramenta de estudo de consequências ambientais diretas da sua implantação, que muitas vezes são ignoradas ou imprevisíveis por parte dos projetistas¹.

Nos últimos anos tem-se assistido à disseminação de aplicações de visualização de SIG através da *web* disponibilizadas por entidades oficiais. É disso exemplo a cartografia temática disponibilizada *online* pelas autarquias portuguesas, com graus variáveis de interatividade – desde simples mapas "analógicos", resultantes da digitalização de cartografia histórica, a camadas com entidades vetoriais desagregadas e com atributos individuais, e possibilidade de pesquisa semântica. No entanto, esta disponibilização de informação é limitada a modelos bidimensionais, com alguns modelos pseudo-3D (também designados como 2.5D) como os modelos digitais de terreno (a partir de grelhas 2D com informação altimétrica). A utilização de modelos 3D permite um vasto conjunto de aplicações adicionais (vide *1.5 Estado da arte*), que não são possíveis de reproduzir (pelo menos não totalmente) em duas dimensões. Também no que diz respeito à informação cartográfica – mesmo em 2D – sobre potencial de energia renovável, existe pouca informação a uma escala suficientemente grande para se revelar útil ao nível do planeamento urbano, salvo algumas exceções como a Carta do Potencial Solar do Concelho de Lisboa (Lisboa E-Nova, 2012).

A utilidade acrescida dos SIG 3D tem justificado que diversas cidades europeias tenham criado modelos interativos, que permitem análises espaciais de outro tipo e visualização mais útil de informação sobre o edificado. Em Portugal existem ainda poucos modelos urbanos tridimensionais, e a diversidade de formatos dos que estão disponíveis torna difícil a sua interoperabilidade, ou sequer a consulta pública. Esta utilidade é tão mais relevante quanto se considerarem as vantagens da interação do cidadão com a informação como relevante para acessibilidade aos serviços públicos, numa lógica hoje materializada no conceito das *smart cities* (Caragliu et al., 2011).

Um dos modelos de cálculo do potencial solar fotovoltaico sobre edifícios é o algoritmo SOL (Redweik et al., 2013), detalhado na secção *1.6 O algoritmo SOL*, que gera nuvens de pontos com informação discreta sobre a radiação recebida. Propõe-se assim a execução de um modelo interativo para avaliação do potencial solar nos edifícios que integre os resultados do algoritmo SOL, funcionando como prova de conceito para uma possível plataforma de visualização e consulta de informação sobre modelos 3D para uma cidade.

1.3 Objetivos

O âmbito do trabalho descrito nesta dissertação é a criação de uma ferramenta de visualização da informação sobre radiação solar em edifícios, que possa ser acessível via *web*, podendo assim constituir uma ferramenta de apoio à decisão, quer para especialistas (e.g.: planeamento), quer para o público em geral. A montante deste resultado será necessário desenvolver e padronizar um modelo de dados, uma

¹Veja-se o caso de um edifício cuja fachada, devido à sua forma côncava, funcionou como concentrador de raios solares ao nível da rua, tendo provocado danos pelas altas temperaturas atingidas (BBC, 2013; The Guardian, 2013).

cadeia de procedimentos, e um conjunto de decisões sobre simbologia e apresentação de informação.

Utilizando como base os ficheiros de texto (descrevendo nuvens de pontos) resultantes do algoritmo SOL, serão desenvolvidos:

1. **Modelo de dados:** o modelo de dados descrito será utilizado como padrão para o processo de geração dos modelos, respeitando os dados de base necessários e estabelecendo a estrutura de dados resultante
2. **Processo de geração:** com base no modelo de dados, será implementado uma sequência de passos para a geração de modelos 3D interativos com informação relevante
3. **Discretização da informação sobre radiação solar:** gerar um modelo a que se associam informações de potencial solar com uma desagregação espacial fina, que permita analisar faces de edifícios com 1 m^2
4. **Modelação de uma área de estudo:** a aplicação do processo será testada a uma área de estudo bem definida, com criação de um modelo com nível de detalhe (LoD) ¹², que servirá como prova de conceito para o processo definido
5. **Disponibilização na web:** partindo da área de teste modelada, será testada a disponibilização desta área numa plataforma web interativa, como forma de teste

Pretende-se que de futuro o processo possa ser totalmente automatizado com base no processo de geração definido. A automatização completa não se inclui no âmbito deste trabalho, mas é possibilitada pela definição do modelo de dados e através da programação integral do processo interativo concebido, com recurso ao ambiente de *scripting* disponível no software utilizado.

1.4 Contribuição científica

A inexistência de modelos disseminados de visualização/análise tridimensional revela-se uma lacuna importante na utilização dos SIG enquanto ferramenta de apoio à decisão. Adicionalmente, a criação de modelos 3D exige por norma uma grande intensidade de trabalho, o que justifica a sua (ainda) limitada presença.

Este trabalho propõe estabelecer um modelo de dados que permita a criação procedimental de modelos 3D, a que se associam informações de potencial solar com uma desagregação espacial fina, sendo possível analisar faces de edifícios com 1 m^2 de resolução. Esta escala de análise não é atualmente possível com a oferta dos SIG 3D mais utilizados (e.g.: CityGML). Será também definido um modelo de dados próprio e um procedimento de modelação que permita um mínimo de intervenção humana na sua criação. Este procedimento é passível de ser futuramente expandido e integrado num processo totalmente automático.

A utilização de uma plataforma de visualização *web* (sem necessidade de *software* adicional) é também um aspeto relevante do trabalho desenvolvido, em linha com os desenvolvimentos mais recentes dos SIG, e a separação clara das operações de produção e edição (tipicamente em *software desktop* próprio) da visualização de dados.

²A definição dos LoD será detalhada na secção 1.5.3 Geração de modelos.

1.5 Estado da arte

A definição de um SIG pode ser difícil de limitar no atual contexto tecnológico, se feita pela perspectiva de um conjunto de componentes que o constituem. Assim, um SIG pode ser definido pelo tipo de ferramentas que oferece: o mapa, a análise espacial e a base de dados, como propõe Maguire (1991). Para lá da modelação espacial, são as relações semânticas entre entidades e as capacidades de análise espacial que distinguem os SIG tanto das ferramentas de cartografia ou desenho (como os CAD) como dos sistemas de bases de dados tradicionais, antes incorporando estes dois campos na sua construção, e considera-se que devem permitir um conjunto de operações de 1) recolha de dados, 2) estruturação de dados, 3) manipulação de dados, 4) análise de dados e 5) apresentação de dados (Raper and Maguire (1992) *apud* Zlatanova et al. (2002)).

No que respeita às realidades urbanas, são frequentemente produzidos modelos SIG urbanos, com a informação centrada nos dados sobre edifícios e na geo-codificação. Estes modelos, possibilitados pelo desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, podem ser de facto uma ferramenta de interação entre cidadãos e gestores das cidades (Batty et al., 2001), permitido pela massificação dos SIG, sobretudo com o advento das ferramentas da *web 2.0* (são disso exemplo os serviços de mapas baseados em *crowdsourcing* – contribuições de dados por parte dos utilizadores), como referido por Batty et al. (2010). É aliás esta abundância de dados – quer os produzidos oficialmente, quer os disponibilizados de forma distribuída pelos utilizadores – uma das bases do conceito de *smart cities*, em que a aprendizagem permitida pelos grandes volumes de informação hoje disponíveis permite melhorar a qualidade das decisões e gestão das cidades (Caragliu et al., 2011).

Um modelo 3D urbano representa dados espaciais ou georreferenciados através de um ambiente tridimensional virtual que inclua modelos de terreno, de edifícios, de vegetação e de redes de transportes. Estes modelos servem para a apresentação, exploração e análise de dados e permitem a sua gestão (Döllner et al., 2006), sendo particularmente úteis em contextos de simulação (Dodge et al., 2011). A visualização de objetos em três dimensões tem claras vantagens em vários campos técnicos e científicos, e como tal existe há vários anos uma grande variedade de ferramentas que permitem esta construção e visualização, o que não se traduz necessariamente por um grande desenvolvimento nesta área no campo dos SIG (Zlatanova et al., 2002). Neste campo, a integração dos modelos (urbanos) 3D exige uma particular atenção à coerência dos dados e à sanidade das suas propriedades geométricas, que devem respeitar regras de topologia, além de regras de coerência semântica no contexto particular dos SIG 3D, como é proposto por Gröger and Plümer (2011).

Os SIG 3D atuais assentam num conjunto alargado de tecnologias, o que dificulta a sua identificação e interoperabilidade (Biljecki et al., 2015), e a sua própria definição é problemática, já que o termo é aplicado a diferentes tipos de dados – com formas de interação diversas – desde grelhas *raster* com valores de altimetria, como os MDT (que a maioria da literatura denomina como modelos 2.5D) cuja utilidade para análise em ambiente totalmente tridimensional é limitada (Zhang et al., 2015) até objetos de geometria implícita, que têm uma posição (coordenadas) bem definida, mas que não podem ser manipulados nem incluídos numa análise espacial. Os modelos com uma definição semântica explícita, como CityGML (Gröger and Plümer (2012) e Gröger et al. (2012)) permitem uma análise detalhada, e o relacionamento *todo* \Leftrightarrow *parte*. O valor acrescentado da utilização das três dimensões sobre os bem estabelecidos modelos bidimensionais é verificável em casos em que só é possível modelar um fenómeno em 3D, ou quando um modelo 3D oferece um incremento de precisão e fiabilidade em relação ao modelo 2D equivalente

(Biljecki et al., 2015).

1.5.1 Aplicações dos SIG 3D

Os modelos de SIG tridimensionais têm um vasto campo de aplicações. Considerando uma análise de possíveis usos de caso, podem contar-se mais de vinte aplicações (Biljecki et al., 2015), em várias disciplinas científicas (vide Figura 1.1).

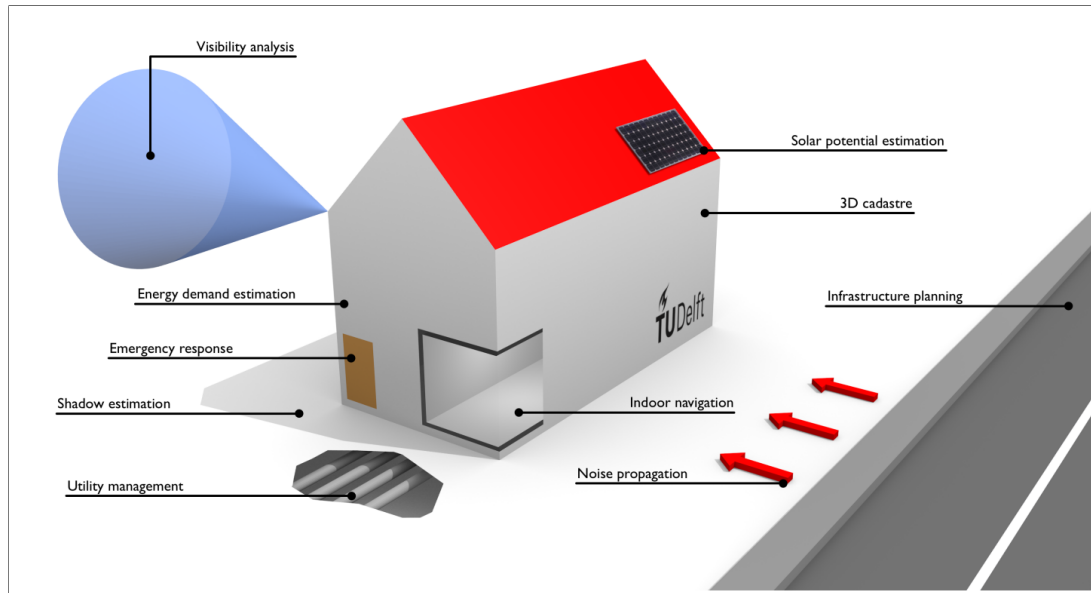


Figura 1.1: Aplicações possíveis para os modelos 3D urbanos. (Biljecki et al., 2015).

Entre os usos de caso/aplicações mais relevantes incluem-se:

- análise de potencial solar: quantificação da energia solar recebida por determinado objeto ou área num dado período do tempo – *tema em que se insere o trabalho presente*;
- análise de visibilidade: previsão de linhas de vista em superfícies topográficas e entre objetos (urbanos ou não);
- estimativas de sombra: verificação *a priori* do impacto de novas construções sobre uma paisagem ou malha urbana já existente no que respeita à exposição solar;
- cadastro tridimensional: possibilita a expansão numa terceira dimensão de cadastro (urbano) em ambiente SIG, impossível em duas dimensões – e.g.: infraestruturas e redes subterrâneas ou aéreas sobre edifícios; prédios com várias frações autónomas sobrepostas verticalmente;
- simulação de fenómenos ambientais: alguns fenómenos ambientais (naturais ou antrópicos) podem ser modelados numericamente utilizando um modelo tridimensional integrado na análise de propagação – e.g.: circulação de ventos, propagação de ruído, comportamento (interações) de radiações eletromagnéticas, simulação dos efeitos de catástrofes como sismos ou inundações;
- visualização: o aspeto 3D utilizado em ambientes de navegação e cálculo de percursos adiciona uma referência espacial importante para a perceção do utilizador;

- publicação de informação: sistemas de informação ao cidadão que impliquem informação que só possa ser representada tridimensionalmente;
- arqueologia: reconstrução de realidades já desaparecidas com base nas capacidades de modelação existentes; são úteis para o desenvolvimento de estudos em arqueologia ao permitirem por exemplo utilizar algumas das aplicações listadas anteriormente.

A lista apresentada não é exaustiva, mas permite uma perspetiva geral sobre atuais utilizações dos SIG tridimensionais. Para lá da elevada especificidade dos algoritmos de cálculo de potencial solar (vide 1.5.4 *Algoritmos de cálculo de potencial solar em 3D*), há outras aplicações na área da energia, como o cálculo das necessidades energéticas de um edifício (Wate and Coors, 2015). A área da proteção civil tem também assistido ao desenvolvimento de diversos modelos de simulação de catástrofe e de resposta (Kemec et al., 2010).

Na área da arqueologia e proteção de património as atuais ferramentas de modelação revelam-se de grande utilidade na reconstituição histórica dos lugares (Botica et al., 2015), havendo já um número alargado de experiências e metodologias para a integração de diversos dados na produção destes modelos (Apollonio et al., 2012). No campo da arqueologia e história de arte, têm existido inúmeros esforços de reconstrução histórica com base em diversos ambientes de simulação 3D (Projeto Cidade e Espectáculo, 2010).

1.5.2 Modelos de dados

No campo dos SIG existe uma variedade grande de formatos de dados, justificadas quer pelas diferentes necessidades a que cada uma procura responder, quer pela concorrência entre produtores de *software*, que representam uma dificuldade no processo de criação e transporte de dados, embora a interoperabilidade destes diversos formatos (pelo menos dos que ainda são mantidos ativamente) seja um problema cada vez menor. Adicionalmente, existem poucas linguagens de modelação adaptadas à representação de entidades geográficas, sendo uma das mais recorrentes a extensão OMT-G (Borges et al., 2001) à linguagem UML. Nos modelos tridimensionais, não existe uma linguagem de modelação dominante, apesar de algumas propostas direcionadas para os SIG 3D, como a de Xu et al. (2010) que propõe um modelo específico.

O *standard* de modelo de dados 3D em SIG mais disseminado é o CityGML (Gröger and Plümer, 2012; Gröger et al., 2012), baseado na *Geography Markup Language* – GML, também adotada como norma ISO 19136 – do OGC (Open Geospatial Consortium, 2016). A GML é uma linguagem de descrição de objetos geográficos baseada em XML. O CityGML lida com a descrição de objetos com diversos níveis de detalhe (cujas características são referidas na secção 1.5.3 *Geração de modelos*) que podem ser encapsulados para diferentes representações de um mesmo objeto, e que inclui a sua descrição geométrica, características e relações semânticas e topológicas, incluindo diversas classes de objetos, vegetação e terreno, agrupados em diferentes classes de aplicação (Figura 1.2). Este *standard*, além de ser de especificação pública, tem como característica a extensibilidade, através das *Application Domain Extensions* (ADE). As ADE permitem, além da derivação de modelos por herança das classes já existentes, a adição de atributos e diferentes geometrias através de mecanismos de ligação (Gröger and Plümer, 2012). Ao nível das aplicações, as áreas e objetos modelados em CityGML oferecem as capacidades possibilitadas pelos SIG tridimensionais, mas a relevância do formato está na interoperabilidade permitida entre diferentes ferramentas pela especificação comum dos formatos de armazenamento dos modelos. Na implementação de estruturas, existem diversas soluções abstratas que lidam com a geometria de objetos tridimensionais

em ambiente SIG, como os SGBD espaciais (e.g.: Oracle Spatial, PostGIS) que implementam os objetos 3D como uma entidade com um vetor de coordenadas que definem vários polígonos – as faces do sólido a modelar – uma vez que não existem primitivas geométricas específicas de objetos 3D (Khuan et al., 2008).

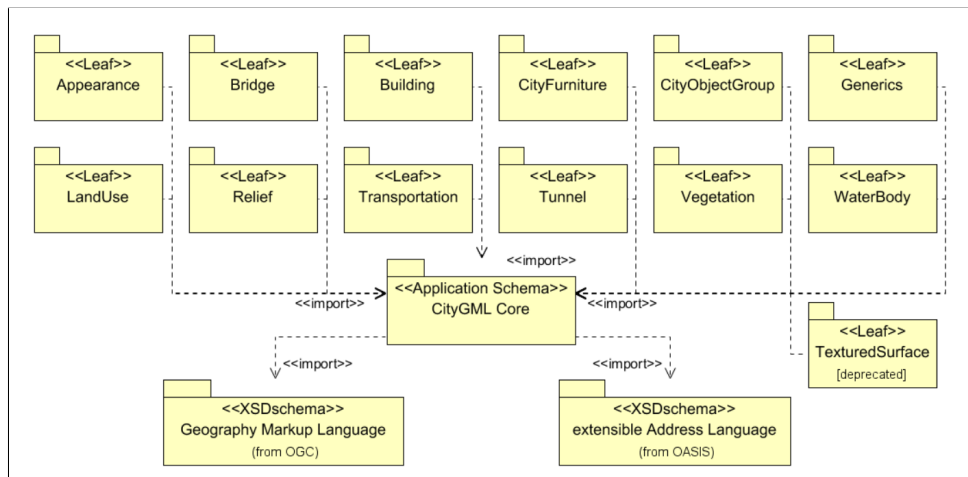


Figura 1.2: Classes de aplicação do modelo CityGML (Gröger et al., 2012).

No interface entre a modelação semântica e a visualização gráfica de um SIG, existe também o projeto OSM-3D.org (Over et al., 2010; OpenStreetMap, 2016), que explora a possibilidade de sobreposição de modelos geométricos tridimensionais sobre um serviço de mapas *web* 2D como adição da informação disponibilizada ao utilizador. É análogo, por exemplo, às camadas de objetos 3D disponibilizadas no *software* Google Earth (Google, 2016).

No que respeita aos edifícios, os *building information models* (BIM) são utilizados há várias décadas como modelos descritores de edifícios e outras estruturas, e incluem informação relevante quer para a fase de projeto, quer como ferramenta de auxílio à manutenção. Os BIM, pela sua complexidade, são hoje uma área técnica/científica autónoma e oferecem muitas capacidades de modelação, nomeadamente do aspeto infraestrutural dos edifícios. A grande diversidade de formatos BIM implica que a sua estrutura de informação seja diversa e potencialmente problemática, apesar da tendência de adesão à taxonomia das *Industry Foundation Classes* (IFC), que é atualmente um *standard* internacional (ISO 16739), poder melhorar este aspeto (Venugopal et al., 2012). As IFC, criadas na década de 1990, são uma base técnica útil na indústria da arquitetura, engenharia e construção, mas lidam sobretudo com os aspetos infraestruturais e construtivos próprios do setor, além de fornecerem ferramentas de planeamento do projeto e de manutenção durante o ciclo de vida. A interoperabilidade no setor dos BIM (Eastman et al., 2008, pp. 65), apesar de alguns desenvolvimentos recentes, é ainda limitada pelos formatos proprietários, e a sua utilização na indústria onde tem origem não é ainda completa, continuando a haver recurso prioritário a ferramentas de projeto tradicionais e pouco integradas (Azhar, 2011).

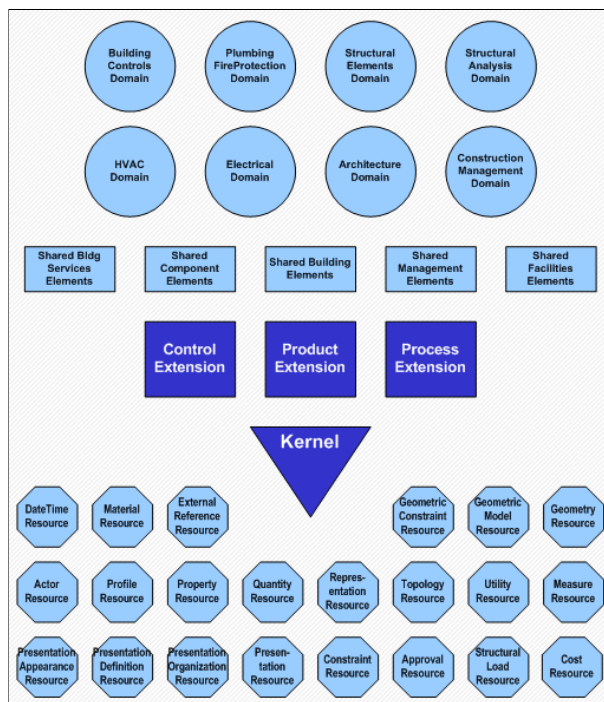


Figura 1.3: Modelo geral IFC (BuildingSMART, 2012).

Os BIM baseados em modelos IFC, apesar da sua especificidade, podem ser traduzidos para formatos SIG (CityGML) mantendo as suas características semânticas (Cheng et al., 2013), mas este tipo de aplicação tem a sua utilidade sobretudo numa perspetiva de construção de um SIG 3D local tendo modelos estruturais como dados de base, diminuindo a necessidade de modelação adicional – uma abordagem que se tornará mais relevante à medida que a indústria de arquitetura e engenharia utilizar mais os BIM. Outra abordagem é a unificação num único modelo de dados que encapsula tanto a informação em IFC, como a correspondente em CityGML (El-Mekawy et al., 2012).

Os modelos de dados atuais já permitem uma grande variedade de representações tridimensionais, desde a escala dos elementos geométricos de base (que deriva em grande medida do desenvolvimento dos CAD e da computação gráfica em geral), passando pelos edifícios, até aos modelos completos de cidades, com grande riqueza semântica e complexidade topológica. Não é possível afirmar, porém, que exista uma infraestrutura implementada (pelo menos não de forma harmonizada) porque estas especificações passam em grande medida por esforços nacionais (Scianna et al., 2008). Existem já propostas desenvolvidas para infraestruturas nacionais de dados 3D, como nos Países Baixos (Stoter et al., 2010). Os modelos dependerão sempre dos domínios de aplicação pretendidos, pelo que não há uma "fórmula" para esta modelação, que pode variar grandemente em função da escala, e verifica-se que não existe um modelo universal que permita responder simultaneamente às necessidades das várias aplicações dos modelos SIG 3D (Khuan et al., 2008), mas é cada vez mais relevante apostar na harmonização para a possível interoperabilidade dos dados, como é exemplo a iniciativa europeia INSPIRE (Comissão Europeia, 2007).

1.5.3 Geração de modelos

Tradicionalmente, um dos aspetos mais dispendiosos da conceção de um SIG é, mais do que a infraestrutura, a mão-de-obra de produção. Este aspeto é particularmente premente na modelação 3D, em que, de acordo com a complexidade e o nível de detalhe (LoD) do modelo, podem ser necessárias

centenas de horas-trabalhador para modelar uma pequena área, de escala inferior à de uma cidade. Esta é tipicamente a realidade da modelação interativa em ambiente CAD, utilizado em arquitetura e engenharia, e cuja adaptação aos SIG, em particular em 3D, implica ela própria grande complexidade.

A modelação procedimental apresenta muitas vantagens na produção de modelos, ao permitir a geração de modelos com recurso a intervenção humana mínima, e tornando possível a "amplificação de dados" em que a partir de um conjunto de dados e regras de transformação é possível criar computacionalmente uma grande variedade de modelos e objetos com características particulares (Smelik et al., 2014). Esta modelação automatizada pode partir de modelos estocásticos, por exemplo para a geração de terrenos em mundos virtuais, ou segundo modelos físicos numéricos, que simulam fenómenos como a erosão (Smelik et al., 2014). Os modelos estocásticos podem ser vistos com um caso particular da modelação baseada em gramática, cujas bases (considerando o conceito de *shape grammars*) foram definidas por Stiny (1980). Nos ambientes de software 3D (SIG e não só) moderno, a principal aplicação centra-se nos edifícios, cuja quantidade e variedade, à escala de uma cidade, implicaria um grande volume de dados, a modelação procedimental permite a criação de cenários com base em conjuntos de dados pequenos, e ao poder funcionar em tempo real (em função da visualização) também permite melhor desempenho, sendo a principal vantagem a capacidade de alterar em grande medida o aspeto das paisagens geradas ajustando os parâmetros das regras utilizadas na criação de modelos (Martinović, 2015).

Verifica-se que a modelação procedimental está hoje patente em várias aplicações para lá dos SIG (em que ainda não é prevalente), sendo mais comum em cenários de simulação e projetos de arquitetura. A modelação baseada na gramática CGA (*Computer Generated Architecture*), parte fundamental do *software* comercial CityEngine, é já aplicada há vários anos em diversos contextos científicos. Um dos mais relevantes, para além da modelação urbana como componente de informação ao público ou de um BIM (Tsiliakou et al., 2014), é a aplicação à arqueologia, em que torna possível a reconstituição de realidades passadas, incluindo para grandes áreas (Müller et al., 2005), com base num conjunto de regras geométricas. A alteração dinâmica destes modelos virtuais é possível com pequenas alterações (por oposição à intervenção necessária num modelo criado interativamente) com ajustes nos parâmetros das regras, à medida que são conhecidos novos aspetos resultantes da investigação histórica sobre os lugares.

Níveis de detalhe

Os LoD utilizados são determinantes na complexidade dos modelos criados, quer na sua construção, em que implicam trabalho humano adicional, como na quantidade de dados necessários para guardar e mostrar estes modelos. A taxonomia dos níveis de detalhe é variável, mas para os modelos urbanos utilizam-se habitualmente os cinco LoD definidos no *standard* do CityGML (Gröger et al., 2012).

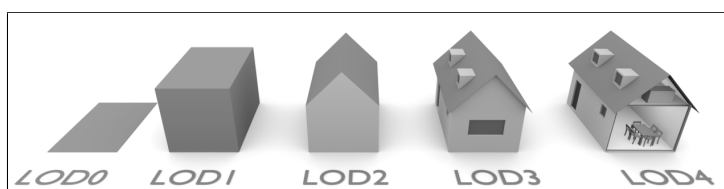


Figura 1.4: Níveis de detalhe segundo a especificação CityGML. (Biljecki et al., 2016a)

Os níveis compreendidos na especificação do CityGML, constantes na Tabela 1.1 e esquematizados na Figura 1.4 são muito utilizados no campo dos modelos 3D urbanos, mas existem propostas de hierarquias

Tabela 1.1: Definição dos níveis de detalhe em CityGML. Adaptado de Gröger et al. (2012)

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Descrição de escala do modelo	regional; paisagem	cidade; região	cidade; parte de cidade; projeto	bairro; modelos de arquitetura (exterior); monumentos	modelos arquitetónicos (interior); monumento
Classe de precisão	mais baixa	baixa	média	elevada	muito elevada
Precisão absoluta em 3D (posição/altura)	inferior a LOD1	5/5m	2/2m	0,5/0,5m	0,2/0,2m
Generalização	máxima	objetos generalizados; >6*6m/3m	objetos generalizados; > 4*4m/2m	objetos realistas; >2*2m/1m	objetos realistas
Infraestruturas	não	não	sim	características exteriores	formas reais
Estrutura de telhado	sim	plano	diferentes planos de telhado	forma real	forma real
Objetos de vegetação	não	objetos relevantes	forma real, >6m	forma real, >2m	forma real

com mais níveis, e definidas em mais do que um eixo de análise, como a de Biljecki et al. (2016a).

O LoD é definido de acordo com os fins pretendidos para um dado modelo, sendo que as implicações do nível escolhido podem por vezes ser difíceis de antever (Biljecki et al., 2016b), como é exemplo a utilização de modelos urbanos na simulação de sombras, com resultados potencialmente diferentes de acordo com o nível usado. A implicação do nível de detalhe na modelação procedimental é relevante quando se consideram por exemplo os problemas de visualização em função da escala (distância ao objeto), em que diferentes LoD (inferiores) podem ser utilizados em tempo real para melhorar o desempenho (Besuevsky and Patow, 2014).

1.5.4 Algoritmos de cálculo de potencial solar em 3D

A grande diversidade, por um lado, de tecnologias de modelação 3D e no seu reverso a consequência de não existir atualmente um *standard* dominante de facto, permite a existência de um grande número de abordagens diversas para o cálculo de potencial solar em meio urbano, para integração em SIG. O levantamento realizado por Freitas et al. (2015) identifica diversos métodos numéricos, alguns utilizados já há várias décadas, que operam sobre dados 2.5D, correspondentes sobretudo a *rasters* de superfícies topográficas (MDT) ou nuvens de pontos capturadas via LiDAR (MDS). A maior parte dos algoritmos identificados baseia-se num número reduzido de modelos astronómicos, e surgem frequentemente integrados num SIG, como componente de software desktop. Existem igualmente alguns exemplos de ferramentas de informação sobre potencial solar (fotovoltaico) baseadas em SIG *web*, sem necessidade

de utilização de *software* específico (Huld et al., 2005), disponibilizando mapas de radiação de grande granularidade (podendo sofrer assim efeitos de generalização excessiva no espaço).

No que diz respeito à integração de uma ferramenta de cálculo de radiação num ambiente SIG, fazendo uso das capacidades 3D, destaca-se o trabalho de Hofierka and Kaňuk (2009), que recorre ao algoritmo *r.sun* do *software* GRASS GIS.

Recentemente destaca-se o trabalho de Liang et al. (2015) em que é proposto o *software* SURFSUN3D, que integra numa única ferramenta autónoma o cálculo, manipulação e visualização de informação de radiação sobre modelos urbanos simples, apresentando uma discretização dos valores quantificados em células, aplicando, na prática, texturas 2D (com os valores de *pixel* de quantidade de radiação recebida) às faces (fachadas e telhados) dos sólidos que constituem o modelo urbano.

O trabalho proposto por Bremer et al. (2016) integra diversas abordagens de cálculo para produção de um modelo de radiação, e distingue-se por ter como objetivo ser uma solução multiescalar, que de acordo com o tipo de dados de base que utiliza, opta por uma abordagem (de cinco possíveis) para que o resultado da modelação seja tão fiável quanto possível.

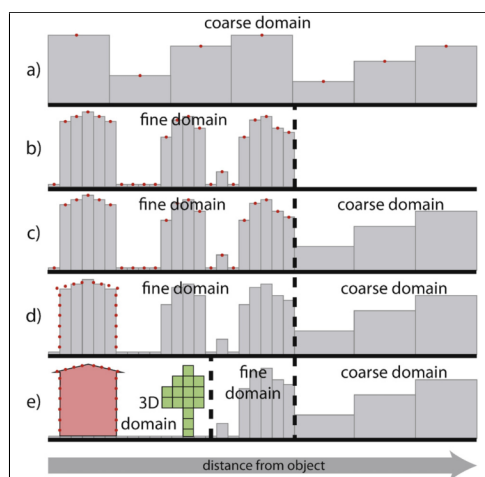


Figura 1.5: Modos de modelação de acordo com o conjunto de dados usado. (Bremer et al., 2016).

A Figura 1.5 mostra os cinco modos de modelação possível, tendo em conta os dados de entrada, estando estabelecida a fronteira entre domínios de dados "grosseiros" e "detalhados", cuja conjugação determina de que forma cada conjunto de dados é considerada na análise. O modo *e*) é o mais complexo, utilizando modelos tridimensionais explícitos para os edifícios, nuvens de pontos (MDS) para a vegetação e terreno próximo e *voxels* para a superfície topográfica mais distante ao objeto sobre o qual é efetuado o cálculo (e.g.: montanhas em torno da cidade de exemplo). Este algoritmo produz objetos geométricos em formato padrão (como CityGML). Devido à sofisticação (dados integrados) da sua análise, apresenta como grande desvantagem o elevado consumo de recursos computacionais, como atestam os autores, sendo necessários grandes períodos de processamento para a modelação de uma pequena cidade.

1.6 O algoritmo SOL

O ambiente urbano moderno apresenta uma complexidade necessariamente difícil de reproduzir em modelos informáticos virtuais, o que inclui também a reprodução das características climáticas naturais e interação com o construído. Existe uma grande variedade de modelos de cálculo de radiação solar sobre

elementos construídos, com diferentes graus de sofisticação. Devido à complexa interação entre elementos, sobretudo no que respeita a elementos construídos, quantificar esta radiação recebida torna-se fundamental (Freitas et al., 2015). Para este efeito existem vários modelos numéricos que lidam com os dados de entrada de várias formas possíveis, baseando-se no aspeto estritamente geográfico e astronómico (além de modelos de clima), a partir de modelos de terreno (MDT) ou de superfície (MDS) e as localizações a estudar, tipicamente em 2D, como o algoritmo de (Hofierka and Kaňuk, 2009) e podendo integrar ou não efeitos como a sombra de obstáculos artificiais ou vegetação.

O algoritmo SOL (Redweik et al., 2013) distingue-se de outros algoritmos de cálculo de potencial solar urbano por considerar, além dos telhados, o potencial energético das fachadas. Os telhados/terraços dos edifícios, por estarem em planos horizontais ou inclinados, têm uma orientação mais favorável à exposição solar e consequente instalação de sistemas de aproveitamento energético. Contudo, as fachadas verticais, tendo necessariamente exposições inferiores, apresentam superfícies úteis muito maiores, o que se pode traduzir num potencial relevante, integrando sistemas de aproveitamento do ponto de vista arquitetónico, cuja viabilidade estaria necessariamente mais comprometida nos telhados. Assim, este algoritmo infere planos verticais a partir de um modelo de superfície (MDS) obtido através de LiDAR aéreo, e calcula a quantidade de radiação recebida para um determinado parâmetro astronómico (*dia do ano e hora do dia*). A granularidade da informação produzida é parametrizável, mas é apresentado como exemplo de caso de uso a informação para a quantidade de radiação recebida em *uma hora* no espaço de *um metro quadrado* de fachada.

A resolução espacial do algoritmo depende da resolução da telha de LiDAR que represente o MDS. A transformação de uma superfície 2D para um conjunto de pontos 3D faz-se através da criação de hiperpontos da fachada, criando um mapa binário de pontos de fachada (obtidos, através de um modelo de declives com base nas cotas dos pontos da telha LiDAR, para os planos de inclinação superior a 72°, que em meio urbano se assume serem fachadas verticais). Através desta identificação de *pixels* pertencentes a fachadas na telha do MDS, são então criados hiperpontos – pontos verticais (Z) sucessivos para cada ponto XY de fachada, com espaçamento regular idêntico à resolução da telha utilizada, que perfazem a altura do plano de fachada. O algoritmo considera a radiação solar global num ponto como a soma da radiação direta e da radiação difusa. Para o cálculo da radiação direta é calculado um mapa de sombras, o qual é binário para os *pixels* correspondentes ao terreno e aos telhados. Para as fachadas é criado um mapa de altura de sombra, o qual apenas contém valores nos *pixels* correspondentes a hiperpontos de fachadas e esses valores, como o nome indica, correspondem à cota da sombra no local do hiperponto. Cada hiperponto pode estar, a uma determinada hora, (1) completamente à sombra, (2) parcialmente à sombra ou (3) completamente exposto ao Sol. O valor da cota da sombra vai determinar a situação de sol ou sombra de cada elemento do hiperponto. A radiação direta em cada ponto será calculada multiplicando o valor tabelado da radiação direta numa superfície horizontal localizada na área de estudo à hora e dia em questão, pelo coseno do ângulo de incidência dos raios solares na superfície em que se encontra o ponto (terreno, telhado ou fachada vertical). Para a radiação difusa, o algoritmo calcula previamente o *sky view factor* (SVF) para toda a área de estudo, um valor que indica a percentagem de céu visível de cada local e que SOL considera constante no tempo (mas variável de ponto para ponto). A radiação difusa é então calculada pela multiplicação do valor tabelado para a radiação difusa em céu aberto para o local dia e hora em questão pelo SVF de cada ponto. Um modelo geral do processo de execução do algoritmo está descrito na Figura 1.6.

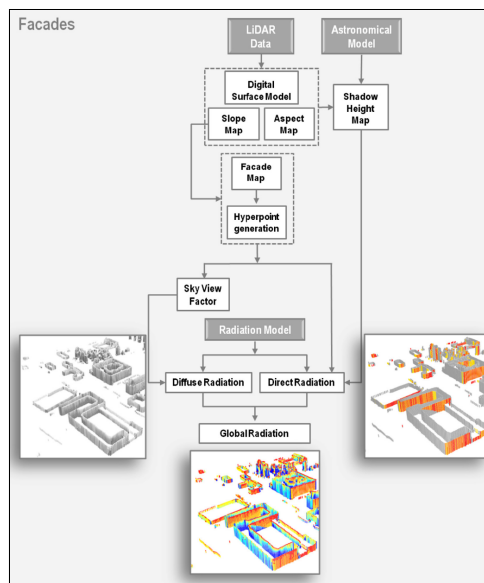


Figura 1.6: Processo de cálculo de radiação em fachadas verticais no algoritmo SOL. (Redweik et al., 2013).

O formato de saída do algoritmo SOL (Figura 1.7) é um ficheiro de texto (com valores separados por vírgulas) que descreve uma nuvem de pontos, obtida a partir da extrusão dos hiperpontos em relação aos pontos de fachada identificados. A primeira linha do ficheiro é um cabeçalho com os nomes dos campos; as linhas seguintes representam os pontos individuais (que partilham um mesmo valor de ID caso pertençam ao mesmo hiperponto) com os valores correspondentes separados por vírgulas. Note-se que para as telhas de LiDAR aéreo utilizadas, os valores *cota_ponto* e *cota_sombra* referem-se à altitude em relação ao nível médio do mar (NMM).

ID,	X,	Y,	Zdem,	svf,	cota_ponto,	cota_sombra,	Rdir,	Rdif,	Rglobal
1,	-87402.47,	-101529.84,	83.96,	0.49676,	83.96,	82.47,	0,	80.9719,	80.9719
2,	-87402.47,	-101530.84,	83.91,	0.43941,	83.91,	82.42,	0,	71.6238,	71.6238
3,	-87402.47,	-101531.84,	83.9,	0.53839,	83.9,	82.42,	0,	87.7576,	87.7576
4,	-87402.47,	-101627.84,	96.31,	0.46901,	84.31,	96.31,	0,	76.4486,	76.4486
4,	-87402.47,	-101627.84,	96.31,	0.47549,	85.31,	96.31,	0,	77.5049,	77.5049
4,	-87402.47,	-101627.84,	96.31,	0.48751,	86.31,	96.31,	0,	79.4641,	79.4641
5,	-87402.47,	-101638.84,	96.34,	0.40888,	79.34,	78.62,	334.9611,	66.6474,	401.6085
5,	-87402.47,	-101638.84,	96.34,	0.40888,	80.34,	78.62,	334.9611,	66.6474,	401.6085
5,	-87402.47,	-101638.84,	96.34,	0.41813,	81.34,	78.62,	334.9611,	68.1552,	403.1163

Figura 1.7: Ficheiro de texto de saída do algoritmo SOL

Os valores para os planos não verticais (em que não são, portanto, gerados hiperpontos) são calculados sobre a geometria da telha LiDAR de entrada, considerando igualmente os mapas de sombras, aplicados apenas aos *pixels* que não são identificados como fachadas. É gerada uma telha em formato ASC (ficheiro de texto com um cabeçalho padrão) que cobre a área exata do MDS de entrada, que é lida em 2D (sem informação de cota) como o mapa de radiação horária para os telhados e/ou chão.

Existe uma implementação para a integração dos dados processados em ambiente SIG (3D), aplicada ao *campus* da FCUL, para visualização e análise da informação sobre radiação nas fachadas dos edifícios, permitindo a associação a um modelo 3D de edifícios (Catita et al., 2014, Secção 4). Esta integração é obtida pela associação espacial dos pontos obtidos (hiperpontos) às superfícies (faces) constituintes dos sólidos/edifícios (fachadas, telhados) que são previamente desagregadas e divididas numa grelha triangular irregular. A partir desta associação, através de identificadores unívocos de edifícios, é possível proceder a diversas análises de dados, recorrendo à seleção e manipulação de atributos.

Capítulo 2

Metodologia

O trabalho descrito nesta dissertação desenvolveu-se em torno da adaptação dos resultados produzidos pelo algoritmo SOL a uma plataforma de visualização *web* através de um processo em vários passos, e segundo um modelo de dados explícito.

Este projeto insere-se numa fase posterior ao processamento da informação de radiação solar sobre cada ponto/hiperponto de fachada e dos planos não verticais (embora se considerem apenas aqueles que pertencem a edifícios, como telhados ou terraços). A Figura 2.1 mostra o âmbito em que se insere a modelação/visualização de informação 3D na cadeia de produção de um modelo SIG 3D sobre potencial solar.

A metodologia proposta neste capítulo lida com as operações e etapas gerais do processo para o modelo de dados utilizado, e a sua implementação aplicada a um caso específico é detalhada no capítulo seguinte: *3 Desenvolvimento de procedimento de modelação e publicação web*.

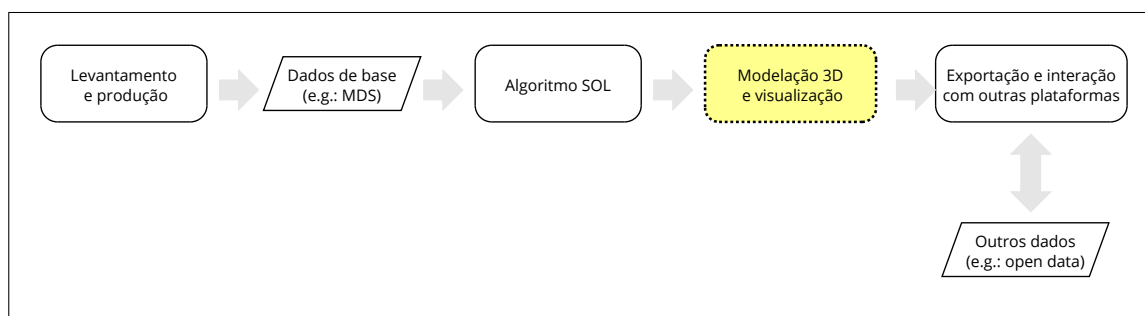


Figura 2.1: Diagrama completo do processo, com destaque para o âmbito do trabalho presente

O procedimento concebido pretende responder a algumas limitações concretas do atual processo de disponibilização de informação, permitindo assim:

1. geração semiautomática e não interativa (ainda que supervisionada) de modelos 3D de edifícios com LoD2 a partir de dados 2D
2. discretização das faces de fachada/telhado dos edifícios, com a divisão em elementos de 1 m² com informação individual
3. utilização de ferramentas de análise espacial totalmente 3D.

No contexto do processo completo de criação de um modelo, a fase de modelação e visualização – de que trata esta dissertação – assume que os dados de entrada já estão processados e são entregues de

acordo com a especificação conhecida (neste caso, a do algoritmo SOL). Estabeleceu-se assim um modelo de dados e procedimento padrão para a geração de modelos 3D, e a sua exportação para uma plataforma *web* comercial de visualização, que pode ser futuramente integrada com outras plataformas (e.g.: através de *webservices*) e com dados adicionais.

2.1 Modelo de dados

A base da implementação de um procedimento de modelação, aqui proposta, é o modelo de dados escolhido. Tal como defende Khuan et al. (2008) não existe uma solução universal que responda às necessidades específicas de todos os domínios de aplicação, apesar de alguma padronização recente, em torno dos modelos semânticos. Existem taxonomias consolidadas em alguns campos de aplicação, como o da arquitetura/construção, que utiliza os BIM, com adesão a normas como a IFC, que se adequa inteiramente aos processos daquela indústria, mas que acaba por se traduzir em alguma rigidez semântica. Assim, e como descrito anteriormente, embora exista alguma interoperabilidade com os SIG, os BIM têm o seu âmbito próprio e não se adequam aos objetivos deste projeto.

Também a utilização da norma CityGML não seria vantajosa, já que obrigaria a uma decisão por um modelo semântico específico, contrariamente à abstração pretendida. Adicionalmente, nas estruturas de dados CityGML não é possível modelar elementos individuais de fachada sem recorrer à especificação de uma ADE, anexa ao *standard*.

O modelo de dados proposto tem por princípio ser extremamente simples, integrando apenas a informação estritamente necessária ao processo de modelação presente. Sendo naturalmente agnóstico no que respeita à implementação utilizada, este modelo é, contudo, resultado indissociável das características do processo definido, e da sua execução, e traduz as opções tomadas quanto à transformação de dados necessária. Não é um modelo fechado e a sua especificação pode ser adaptada – simplificada ou expandida – de acordo com futuras evoluções do processo de modelação.

A linguagem de descrição utilizada é a OMT-G, pela sua relativa aceitação enquanto ferramenta de descrição de bases de dados geográficas, e por ser derivada do UML, o *standard de facto* de modelação conceptual.

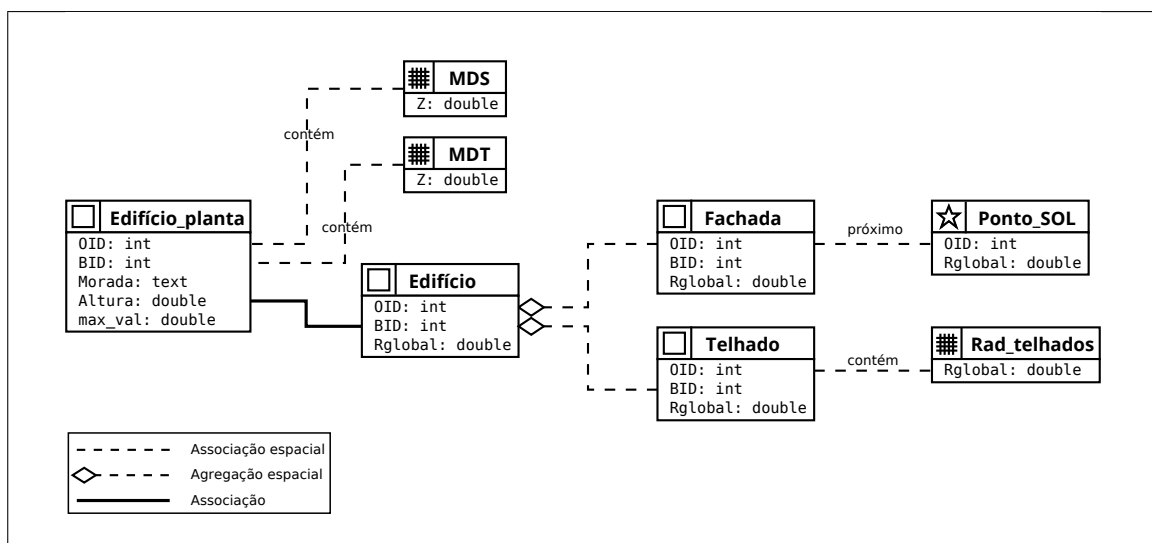


Figura 2.2: Modelo de dados proposto

A Figura 2.2 mostra o modelo de dados proposto para o processo, com integração dos dados de entrada nos dados tridimensionais, que se descreve na secção seguinte.

2.1.1 Condições de utilização

A adesão a um algoritmo com formato de dados específico, além da utilização do modelo de dados proposto impõe que os dados de entrada disponíveis cumpram determinadas funções e respeitem uma especificação. Assim, para o processo definido neste trabalho, os conjuntos de dados devem estar de acordo com os seguintes formatos, respetivamente:

MDS – telha raster (formato de texto ou imagem georreferenciada) com os valores de altimetria (cota) para a área a modelar, incluindo vegetação, edifícios e outras estruturas

MDT – telha raster (formato de texto ou imagem georreferenciada) com os valores de altimetria (cota) para o terreno da área a modelar, uma vez removidos a vegetação e estruturas construídas, para que apenas esteja representada a superfície topográfica em que assentam os objetos a modelar

plantas dos edifícios – camada vetorial 2D poligonal representando as bases de implantação dos edifícios no terreno, podendo conter (não obrigatoriamente) atributos úteis como morada (ou outra geocodificação), características técnicas do edifício, etc.

pontos (SOL) – ficheiro de texto multicolumna com a representação XYZ dos pontos resultantes da extensão dos hiperpontos das fachadas verticais dos edifícios (cf. 1.6 *O algoritmo SOL*) incluindo valores de radiação

telhas com valores de radiação (SOL) – telha raster (formato de texto ou imagem georreferenciada) com os valores de radiação para toda a área de estudo, tendo por função fornecer os valores de radiação (determinados pelo algoritmo SOL) nas superfícies não verticais, como chão (não considerado neste trabalho) e telhados/terraços

Auxiliar: regras CGA – ficheiros de texto com a descrição das regras de geração automática de objetos a partir de polígonos de plantas dos edifícios em linguagem CGA

Nota: os MDT e MDS são necessários na metodologia proposta, mas têm por função permitir obter a altura dos edifícios cuja planta é utilizada. Se a camada de planta dos edifícios tiver como atributo a altura destes, os dados de MDS e MDT deixam de ser utilizados no processo. O MDT é contudo útil para a geração de uma superfície topográfica realista no modelo final.

2.1.2 Saída de dados

Os dados gerados no processo são integrados na base de dados, numa *File Geodatabase*, sendo os objetos 3D guardados, como é obrigatório com a utilização daquela estrutura, numa *feature class*, com geometria do tipo *multipatch*, um formato da ESRI, que é semelhante ao tipo poligonal mas adiciona algumas propriedades topológicas e permite a representação tridimensional dos objetos, como detalhado na documentação oficial (*whitepaper*) do tipo *shapefile* (ESRI, 1998).

2.2 Arquitetura do sistema

No atual estado de desenvolvimento dos SIG, existe uma assinalável diversidade de ferramentas e plataformas de publicação de dados. Em ambiente *desktop* existem diversas aplicações que permitem a edição avançada de camadas de dados SIG, e a sua interface com bases de dados, serviços de mapas sobre *web*, etc. Também no que respeita à deteção remota, existem várias opções, com campos de aplicação específicos que permitem processamento avançado e interface com os SIG, quer no campo do *software* livre, quer comercial/proprietário.

Os SIG 3D, pelo seu desenvolvimento mais recente e grande dispersão de formatos implicam a combinação de mais tipos de dados, e consequentemente, mais interações entre diferentes tipos de *software*. Incluem-se aqui os editores *desktop* que permitem a inclusão de dados 3D ou pseudo-3D (aliás 2.5D), e geradores de objetos com características semânticas que permitam integrar SIG, como CityGML (para o qual existem diversas ferramentas de edição/exportação) ou modelos *ad-hoc* integrados em plataformas de visualização, como o Google Earth.

Também no que respeita a plataformas *web* (acessíveis a partir de um browser) existem diversas soluções fechadas de visualização de modelos 3D urbanos, tanto proprietárias como abertas, exemplo do que já existe (em fase experimental) para o OSM, como referido em 1.5.2 *Modelos de dados*, ou as soluções de visualização 3D em cidades na plataforma Mapbox (Mapbox, 2016).

Considerando esta diversidade de soluções, foi necessário selecionar as ferramentas a utilizar para a execução deste projeto. A opção teria de ter em conta os seguintes critérios:

- ambiente SIG de raiz: procura-se um ambiente SIG integrado em que seja possível estabelecer relações semânticas e espaciais entre objetos, além de permitir utilizar ferramentas de análise espacial;
- adequação a dados 3D: as geometrias 3D comportam necessidades específicas que devem ser bem representadas no ambiente de edição, além de se pretender uma solução para geração dinâmica de modelos;
- possibilidade de estabelecer um *workflow* coerente: considerando um horizonte de possível automação, devem existir ferramentas para estabelecer um procedimento padrão (supervisado) e que seja futuramente programável;
- capacidade de exportação de dados, e interface com outras plataformas: a necessidade de visualização em plataformas web e a possibilidade de futura integração de dados adicionais são obrigatórias.

Considerando que poucas opções respeitam totalmente estes requisitos, a decisão foi no sentido de optar pelo *software* ArcGIS Pro, produzido e comercializado pela ESRI, Inc., disponível na versão 1.3 à data de realização deste projeto. Este ambiente permite a integração total dos dados SIG em ambiente puramente tridimensional, e tem como principal vantagem a interface com uma plataforma web (ArcGIS Online) e com outro *software* ESRI, caso do CityEngine. Outra vantagem associada a esta opção é a grande quantidade de documentação disponível, quer por parte do produtor, quer pela grande comunidade de utilizadores, mesmo tratando-se de *software* relativamente recente. A possibilidade de criação semiautomática de modelos tridimensionais – modelação procedimental (vide 1.5.3 *Geração de*

modelos) – a partir de camadas 2D é uma característica distintiva deste ambiente, face a alternativas que exigem modelação interativa.

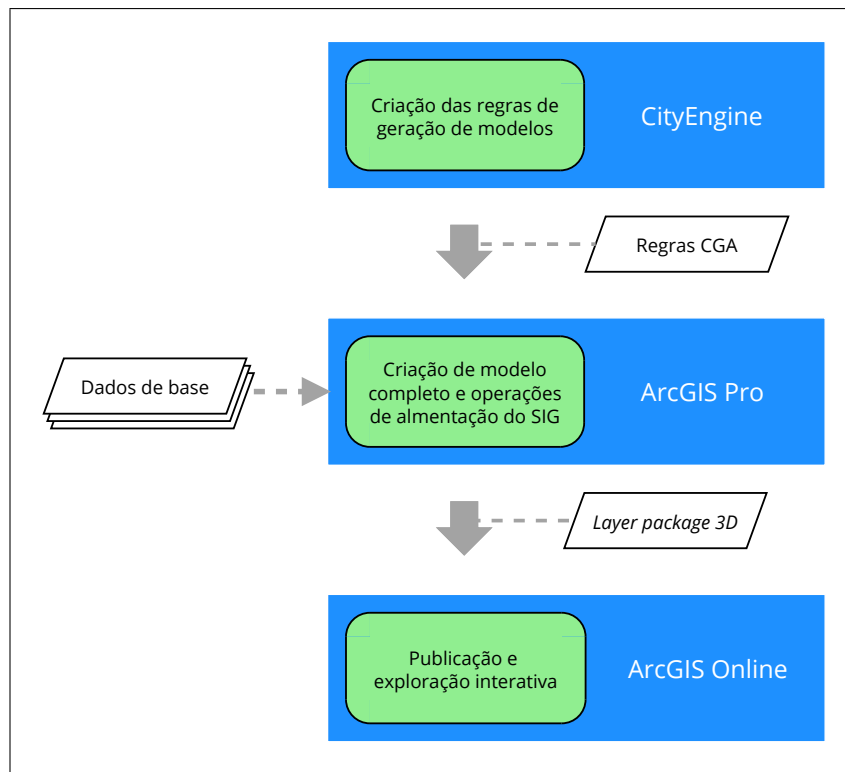


Figura 2.3: Ferramentas utilizadas no processo

Assim, o software utilizado tem três componentes principais, como representado na Figura 2.3, com propósitos diferentes:

- CityEngine – criação segundo uma gramática definida de regras que gerem modelos de edifícios e integráveis na fase subsequente;
- ArcGIS Pro – todo o processo de construção do SIG, manipulação de dados, estabelecimento de relações, análise espacial e criação de modelos com simbologia adequada;
- Portal for ArcGIS / ArcGIS Online – publicação de informação e visualização 3D (com atributos) acessível através de um *browser web*.

Para o trabalho desenvolvido, foi utilizada como plataforma o *Portal for ArcGIS*, tendo sido instalada uma instância local na infraestrutura da FCUL, o que garante a independência da disponibilidade da plataforma *ArcGIS Online* – que oferece capacidades semelhantes (ESRI, 2015).

2.2.1 Regras CGA

As regras CGA (ESRI, 2016c; Müller et al., 2006) seguem uma gramática de formas que permite a modelação em massa a partir da manipulação sequencial do elemento básico desta gramática, a *shape*.

Os três atributos mais relevantes da *shape* (representados na Figura 2.4) são *scope*, que define os limites espaciais do objeto, *pivot*, que estabelece um ponto de referência espacial e orientação e *geometry*,

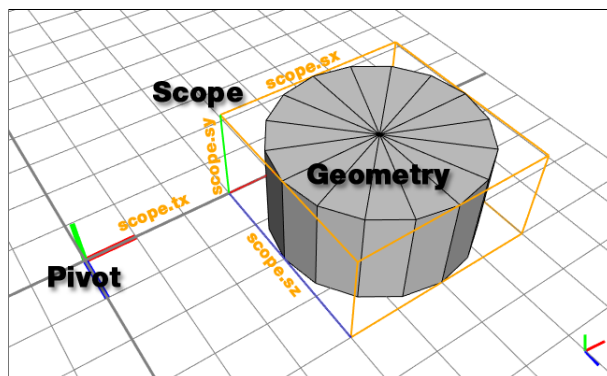


Figura 2.4: Características de uma *shape* (ESRI, 2016c)

que define a forma do objeto (Martinović, 2015, p.21). A gramática CGA utiliza como construção uma regra do tipo genérico

$$id : predecessora : cond \xrightarrow{tr} sucessora : prob$$

em que *id* é o identificador único da regra, *predecessor* é o identificador da *shape* a ser substituída, segundo uma transformação *tr*, por *sucessora* e *cond*, opcional, é uma expressão condicional que tem de ser avaliada verdadeira para que a regra seja aplicada. O elemento *prob*, opcional, permite variações estocásticas do modelo gerado (e.g.: permite atribuir texturas ou alturas diferentes a edifícios gerados aleatoriamente segundo a mesma regra).

A linguagem CGA é parte integrante do *software* CityEngine (ESRI, 2012), sendo a base da modelação procedimental que permite a manipulação em massa das *shapes* a modelar.

Utilizando a especificação da linguagem CGA, um exemplo de uma regra simples será:

```
1: Shape --> extrude(y, 10m) Edifício
```

em que ao polígono Shape é aplicada uma extrusão vertical de 10m, sendo criada a *shape* Edifício. As expressões são avaliadas sequencialmente pelo interpretador até que não existam mais formas a transformar. No exemplo apresentado, a execução da regra só continuaria se Edifício fosse uma forma não-terminal, i.e. se sofresse transformações adicionais.

2.2.2 Plataforma web

O ArcGIS Online / Portal for ArcGIS (ESRI, 2016d) é uma plataforma de publicação de dados integrável com o software ArcGIS nas suas diversas versões e componentes, e utilizando formatos de dados da ESRI, como o *shapefile*.

A utilização desta plataforma permite:

- visualização de modelos com consulta de atributos individuais
- simulação de sombreamento de acordo com a hora do dia
- interação com diferentes camadas presentes no SIG
- criar uma *web application* personalizada, correspondendo a uma página de visualização

Existem também algumas limitações, debatidas no capítulo 4 *Análise de resultados e alternativas*. No entanto, considera-se que cumpre requisitos suficientes para mostrar um modelo de informação 3D satisfatório.

2.3 Especificação do processo

O processo estabelecido, adiante aplicado à modelação de uma área específica, está descrito esquematicamente através dos seus passos principais, indicando-se que dados são integrados em cada fase do processo.

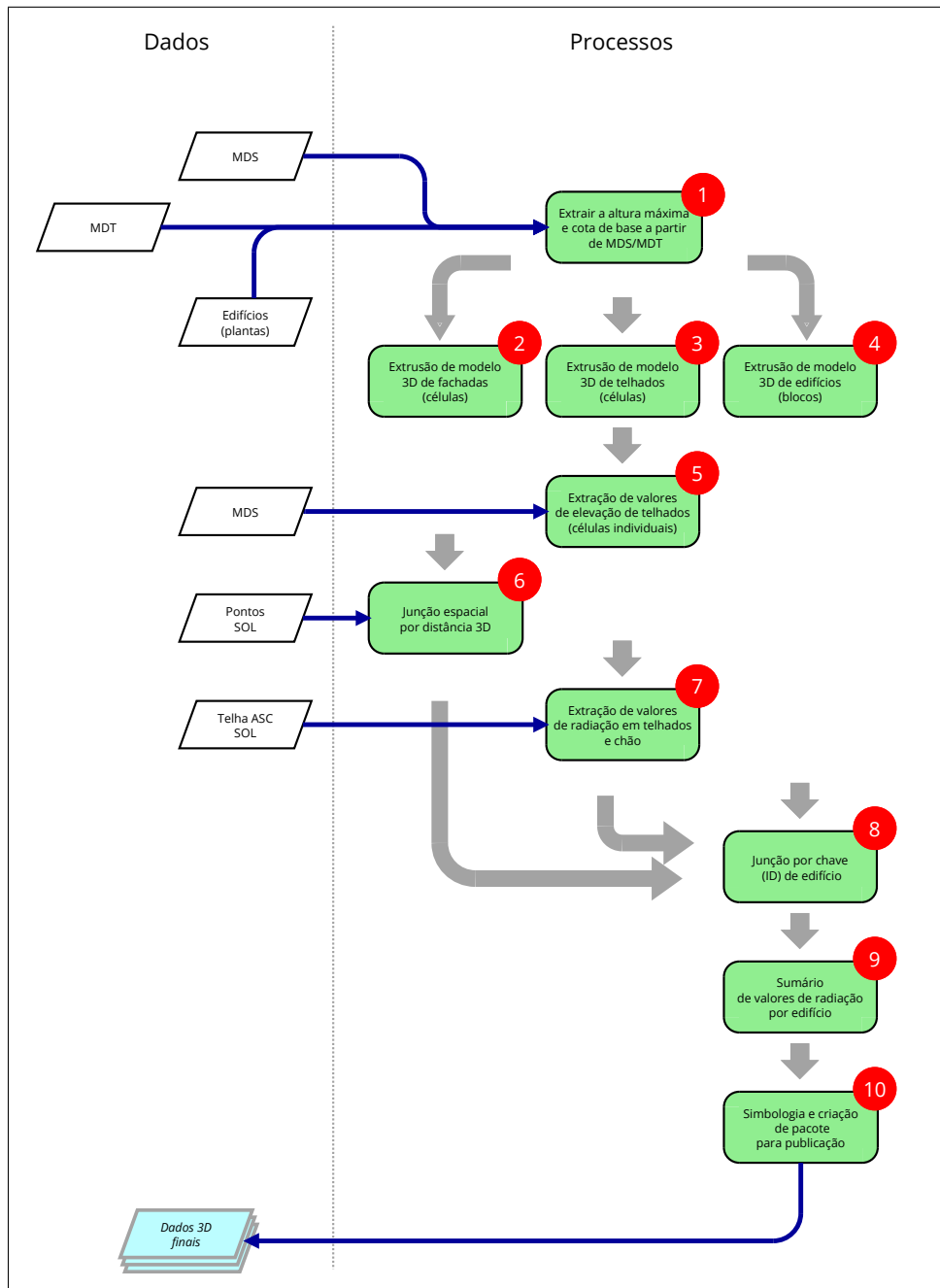


Figura 2.5: Diagrama com as etapas do processo

Os passos descritos na Figura 2.5 cumprem as seguintes funções:

0. (não assinalado no diagrama) **normalização dos dados de entrada:** assume-se que os dados respeitam a estrutura descrita no modelo de dados, contendo os atributos assinalados (além de eventuais campos adicionais) com os correspondentes tipos de dados

1. **extração de alturas:** através da subtração entre valores de MDT (elevação do terreno) e MDS (valor de altitude absoluta) para cada polígono, é possível obter o atributo altura de cada edifício, sendo extraído o valor máximo do MDS e o valor médio (contido no polígono) da grelha com valores de elevação do terreno. *Nota: se os polígonos de edificado já tiverem como atributo o valor de altura, obtido previamente, este passo é opcional, e o MDS e MDT deixam de ser necessários no projeto*
2. **extrusão do modelo 3D – fachadas:** aplicação da regra CGA de construção de fachadas, para cada edifício serão criadas fachadas verticais (faces laterais), posteriormente divididas em intervalos de 1 m vertical e horizontalmente, criando as células individuais cada uma com os seus atributos próprios)
3. **extrusão do modelo 3D – telhados:** aplicação da regra CGA de construção de telhados, criando a face horizontal superior dos edifícios, posteriormente divididas também em células individuais de 1 x 1 m, e inicialmente com valor de elevação correspondente ao topo dos edifícios
4. **extrusão do modelo 3D – blocos:** criação de blocos simples a partir da extrusão vertical das plantas dos edifícios (utilizando regra CGA), apenas com faces laterais (fachadas) e superior (telhado), sem subdivisões, para visualização rápida e posterior associação (agregação) às células individuais, tal como explicitado no modelo de dados
5. **extração de valores de elevação dos telhados:** extração dos valores de altura constantes na telha LiDAR (MDS) para atribuição de um valor de altura (valor Z na geometria do objeto) individual a cada célula da face de telhado (criadas no passo 3), que permita conferir maior realismo na representação do modelo em LoD2
6. **junção espacial:** os pontos com valores de radiação resultantes do algoritmo SOL estão representados em três dimensões no modelo SIG e são associados através de uma operação de junção espacial (*spatial join*) com um raio de procura 3D de 1 m aos pontos individuais das fachadas, já que apenas os hiperpontos são representados com coordenadas XYZ, para associação a diferentes níveis de altura nas fachadas. Este passo adiciona um atributo (radiação) à camada de dados das fachadas
7. **extração de valores de radiação (telhados):** extração a partir da telha resultante do algoritmo SOL dos valores de radiação por correspondência da posição XY das células de telhado com as posições na telha de valores de radiação. Este passo adiciona um atributo (radiação) à camada de dados dos telhados
8. **junção por chave:** associação a partir do valor de ID original do edifício das células individuais (telhados e fachadas) aos blocos gerados no passo [4] através da criação de uma tabela de ligação (relação)
9. **sumário:** criação de um valor de sumário (somatório de valor acumulado total, embora possa ser definido outro valor, como a média por unidade de $1m^2$) para o total de um edifício (associado aos blocos gerados no passo [4]) em função dos seus elementos de fachada/telhado
10. **criação de package 3D:** criação de ficheiros (um por camada) para colocação na plataforma online e posterior interrogação/visualização de valores

Nota: os passos intermédios próprios da operação do software SIG mas irrelevantes para a descrição do processo, como a criação de tabelas auxiliares e posterior transferência de valores para as tabelas de atributos das camadas de dados, são omitidos desta descrição.

2.3.1 Criação de tarefa

O ambiente ArcGIS Pro permite a criação de tarefas (*tasks*) que agregam uma sequência de passos utilizando as operações de manipulação de dados e análise espacial em SIG presentes no software (ESRI, 2016a). Estas sequências de passos podem ser totalmente automatizadas, dispensando quase qualquer intervenção do utilizador, ou podem implicar algum grau de supervisão (de acordo com a quantidade de parâmetros envolvidos em cada operação). Estas tarefas que incluem as instruções passo a passo ao utilizador são parte integrante de um projeto, mas podem igualmente ser exportadas num ficheiro autónomo para integração em qualquer outro projeto.

Um dos produtos do projeto descrito nesta dissertação é um ficheiro de tarefa (vide www.msdm.eu) que pode ser integrado e modificado no contexto de qualquer projeto SIG que pretenda seguir a metodologia aqui apresentada.

Um item de tarefa, como o que foi criado, compreende um conjunto de tarefas. Cada tarefa é constituída por passos individuais, que podem ser comandos no ambiente do software (e.g.: mostrar/ocultar uma camada de dados) ou a execução de uma ferramenta (que por exemplo crie uma nova camada).

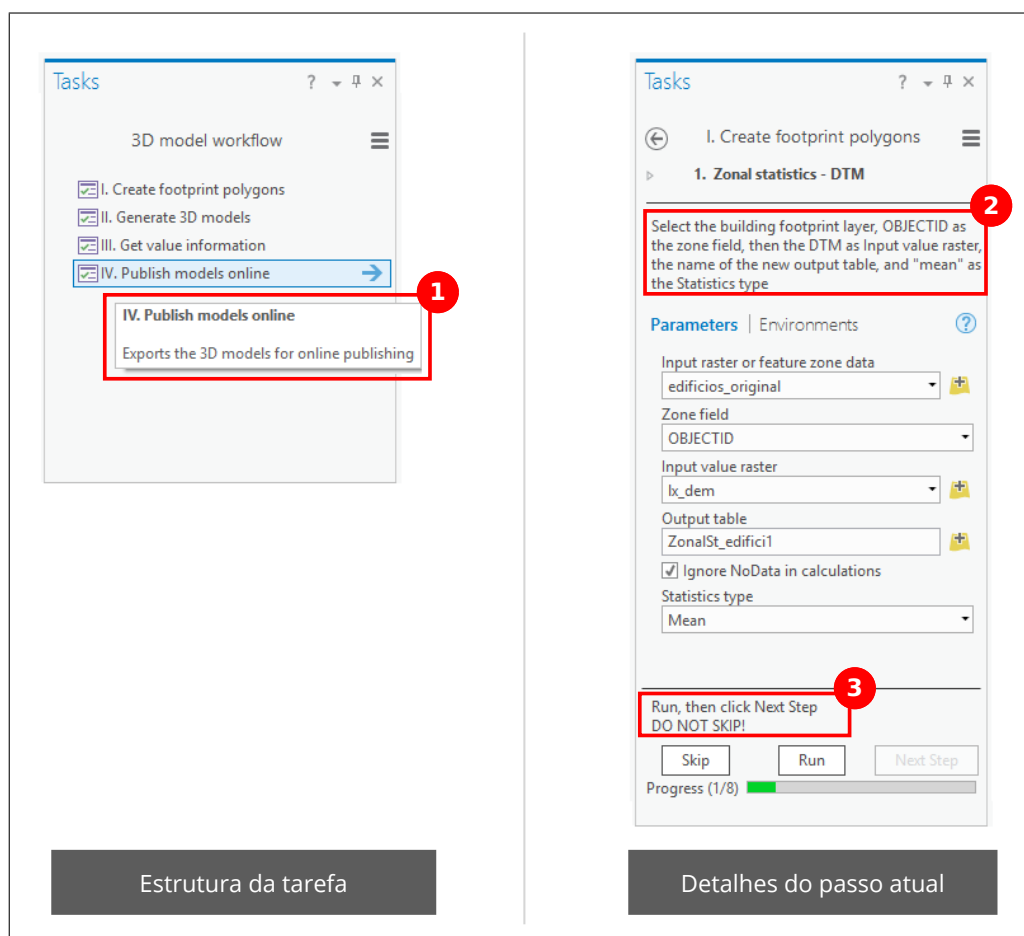


Figura 2.6: Interface geral de uma tarefa em ArcGIS Pro, e de um passo da tarefa

O aspeto da interface de uma tarefa em ArcGIS Pro é visível na Figura 2.6. Cada tarefa/passo tem uma descrição associada, consultada na forma de *tooltip* sobre o nome da tarefa, que explica a sua função ao utilizador (assinalada com o nº 1 na figura). Dentro de cada passo da tarefa o interface assumido é o da ferramenta (ou comando) associada, com instruções adicionais sobre a forma como os dados devem ser utilizados no caso de uma tarefa específica (assinaladas com o nº 2). Indica-se ainda como prosseguir para o passo seguinte (nº 3). A flexibilidade na criação destas instruções permite a explicação interativa do processo ou *workflow* a seguir, fornecendo ao utilizador a informação sobre qual o papel de cada passo do processo, o que possibilita a sua adaptação a outros fins. A tarefa específica concebida neste projeto tem a possibilidade de saltar (*skip*) todos os passos, para que seja possível consultar as suas instruções individuais antecipadamente, ou para que o processo possa ser parcialmente repetido, mas prevê-se que a tarefa apenas tenha de ser executada uma única vez e com a sequência exata de passos. Os passos incorporados na tarefa associada a este projeto são executados no capítulo seguinte.

Capítulo 3

Desenvolvimento de procedimento de modelação e publicação *web*

Um dos objetivos principais deste projeto é permitir a visualização de uma cidade (ou parte) em 3D como ferramenta de informação ao utilizador. Assim, este capítulo descreve brevemente o processo definido no capítulo anterior, quando aplicado a uma área urbana já processada no algoritmo SOL, e para a qual existem os dados adicionais necessários. O processo aqui descrito serviu como teste de viabilidade para a aplicação da arquitetura de sistema proposta à escala de um bairro.

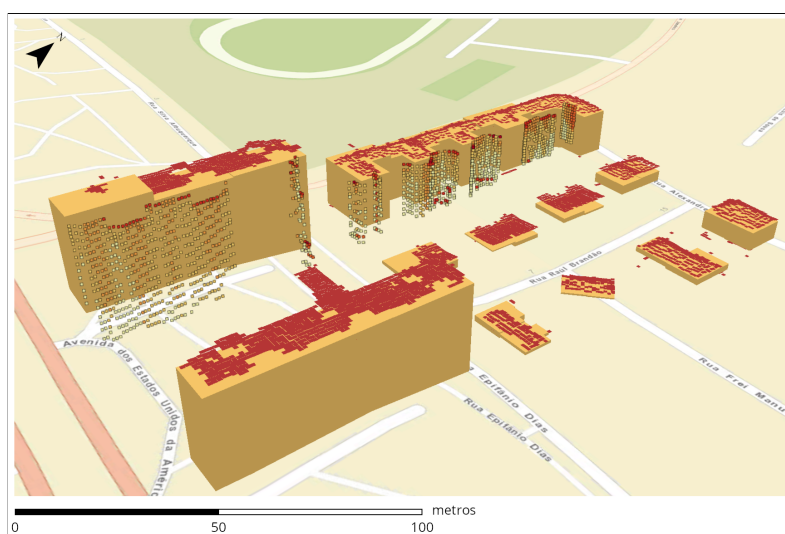


Figura 3.1: Aspeto geral da cena 3D, com várias camadas de dados parcialmente visíveis

3.1 Estudo de caso

Como exemplo de execução de um processo de modelação, foi seleccionada uma área da cidade de Lisboa, fronteira à Av. dos Estados Unidos da América, assinalada na Figura 3.2, cuja telha de LiDAR (MDS) tinha já sido processada pelo algoritmo SOL, estando disponível um conjunto de nuvens de pontos e telhas, para todos os dias do ano/horas do dia. Usam-se como polígonos de base as plantas (bidimensionais) dos edifícios, constantes na camada vetorial de edificado, fornecida pela CML (cf. Tabela 3.1).

A área que será modelada com elementos de fachada e telhado com dimensão de 1 x 1 m será um



Figura 3.2: Área de estudo

subconjunto de 28 edifícios, de tipologias diversas, da área de estudo total, assinalado na Figura 3.3. Esta seleção resulta da decisão de modelar um conjunto de dados pequeno, já que foi verificado experimentalmente que a modelação completa da área correspondente à telha LiDAR utilizada (com 500 x 500 m), que compreende 323 edifícios, incluindo alguns com altura superior a 50 metros, resultava num modelo com mais de 400 000 polígonos, cuja navegação e, sobretudo, operações de análise espacial eram impraticáveis. Este é o principal obstáculo do trabalho, e resulta da própria forma como o *software* utilizado lida internamente com os dados gerados.

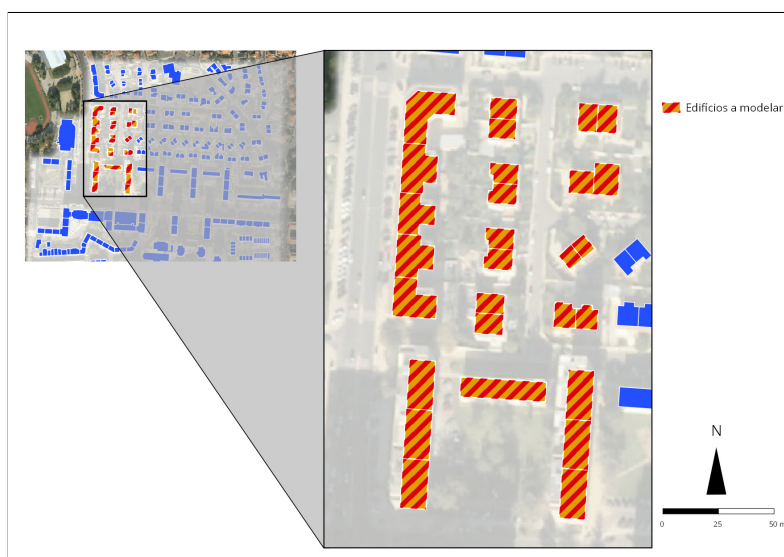


Figura 3.3: Área a modelar em 3D, com elementos de fachada/telhado

Utiliza-se como dados de entrada sobre radiação solar, uma nuvem de pontos e telha de radiação (telhados) referentes às 16:00 do dia 21/06 (solstício de verão).

3.1.1 Fontes de dados

Os dados utilizados no projeto de modelação, de acordo com o estabelecido na secção 2.1.1 *Condições de utilização*, são os descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Fontes de dados

Descrição	Fonte (produtor)	Tipo	Características
Edifícios (planta) – polígonos	CML	Vetorial – polígono	SRC original: ETRS89-PT TM06
Modelo digital de superfície	LOGICA	Matricial (GeoTIFF)	Telha LiDAR (aéreo) – Reamostrada a 1 x 1 m, precisão horizontal: 0,5 m; precisão vertical: 0,15 m
Modelo digital de terreno	CIGeoE	Matricial (GeoTIFF)	Reamostrado a 5 x 5 m, a partir das curvas de nível da carta topográfica 1:25000
Pontos SOL	Redweik, P.	Texto (CSV)	Resolução horizontal e vertical de 1 m
Radiação – superfícies horizontais	Redweik, P.	Matricial (ASC)	A partir de telha LiDAR (aéreo) – Reamostrada a 1 x 1 m

3.2 Processos e produtos

3.2.1 Preparação dos dados

Tendo por base a opção seguida em relação ao *software*, considerou-se conveniente utilizar a implementação de dados própria do ArcGIS Pro. Os dados foram carregados numa *file geodatabase*, que agrega as tabelas (espaciais e não espaciais) numa única pasta, que pode ser acessível externamente (apesar de essa prática não ser recomendada pelo produtor do formato), com um SRC comum. Nesta fase são criados os temas originais 2D e a nuvem de pontos 3D, convertida a partir de um ficheiro de texto.

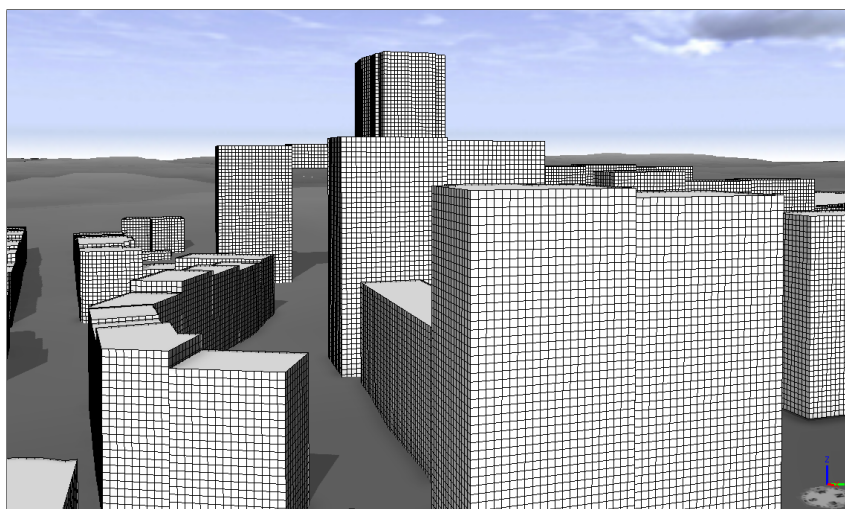


Figura 3.4: Exemplo de modelos (fachadas divididas) em CityEngine

Em ambiente CityEngine são definidas as regras de modelação procedimental, e testa-se a sua aplicação às plantas dos edifícios.

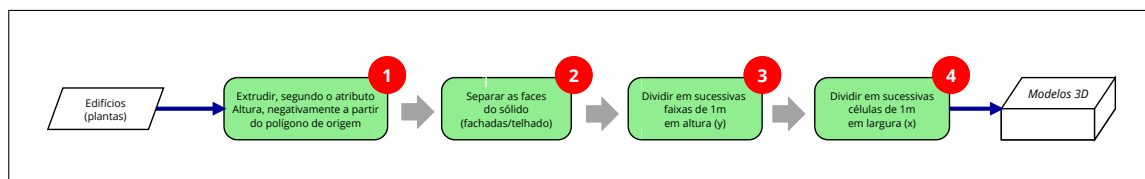


Figura 3.5: Diagrama do processo da regras CGA

As regras CGA definidas em CityEngine seguem a descrição presente na Figura 3.5 tendo como dados de entrada a camada com as plantas dos edifícios, e fazendo uso do atributo *altura* como dimensão da extrusão do sólido. No caso dos edifícios completos (blocos) só é executado o passo 1 assinalado. Note-se também que este passo (extrusão) é efetuado negativamente a partir do polígono de origem, já que desta forma todas as células criadas terão desde o início como atributo geométrico a altura absoluta, em relação ao NMM, resultado da informação constante no MDS. O passo 2 é diferente conforme se trate da regra referente ao telhado ou às fachadas. O código destas regras pode ser consultado em A.1 *Código-fonte das regras CGA*.

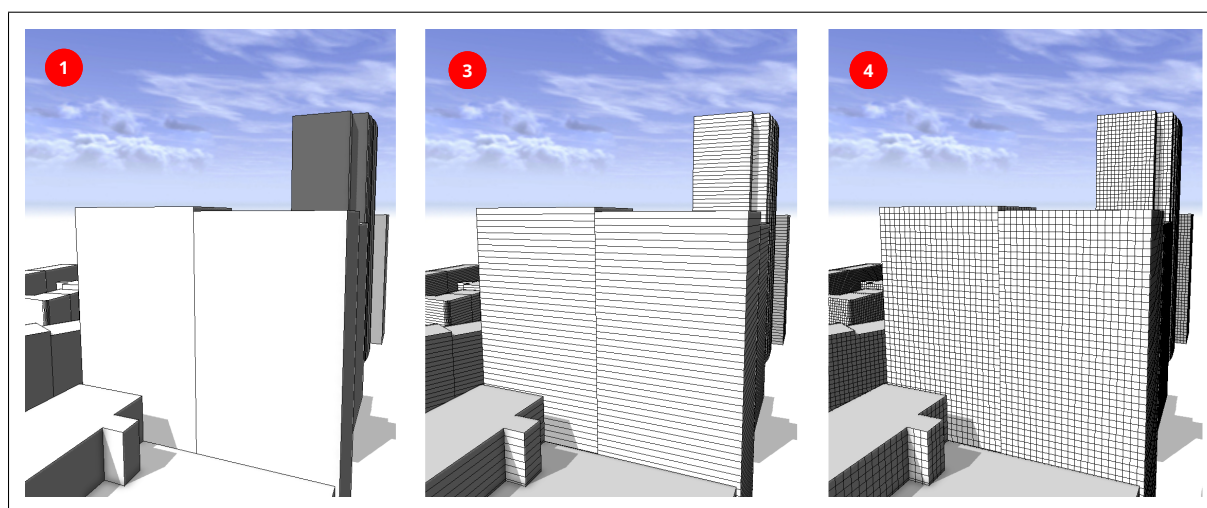


Figura 3.6: Geração de edifícios e posterior divisão em células em CityEngine

Na Figura 3.6 são visíveis as sucessivas transformações executadas até ao modelo final, estando assinalados os passos correspondentes ao diagrama da Figura 3.5. Uma vez definidas, estas regras CGA são então encapsuladas em ficheiros binários com a extensão *.rpk* que podem ser lidos em ArcGIS Pro.

3.2.2 Geração de modelos

A camada poligonal correspondente às plantas dos edifícios é submetida neste passo da tarefa à geração de modelos 3D segundo o ficheiro *.rpk* (*rule package*) utilizado. São gerados três modelos, cada um segundo o seu *rule package*, correspondentes às fachadas, telhados e edifícios inteiros.

Seguindo os passos da tarefa estabelecida, o primeiro procedimento é a criação de camadas válidas de plantas dos edifícios. No caso deste projeto, e como discutido na secção anterior, é calculada a altura associada a cada edifício (através da extração de valores de altitude a partir do MDT e MDS) e introduzido

como atributo geométrico (Z) a altitude absoluta do topo de cada edifício, a partir da qual é criado o modelo de sólido.

Os modelos são criados sucessivamente de acordo com três pacotes de regras, criando três camadas:

- edifícios (blocos) (adiante designado por Edifícios);
- telhados, dividido em células 1 x 1m (adiante designado por Telhados);
- fachadas, divididas em células 1 x 1m (adiante designado por Fachadas).

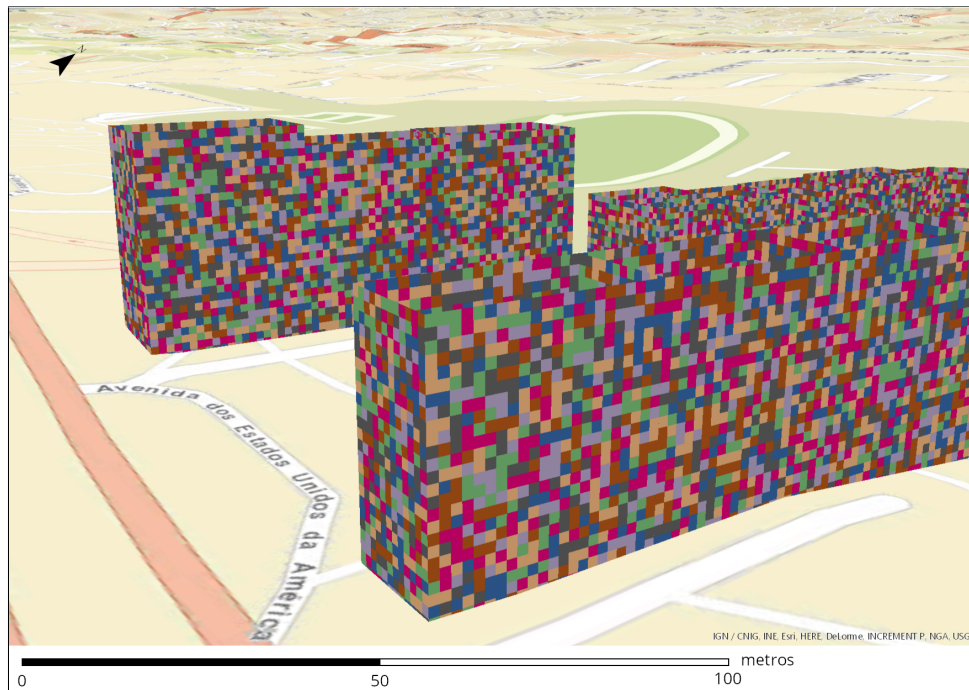


Figura 3.7: Modelo da camada Fachadas com células individuais (cores aleatórias)

Aos telhados é adicionado um passo após a divisão, como assinalado no diagrama da secção 2.3 *Especificação do processo*, em que cada célula de telhado obtém um valor de cota individual, extraído do MDS, para permitir um grau de realismo aceitável em LoD1. O processo de criação das células implica a inclusão de um novo campo de chave como atributo do polígono de origem – BID – o que adiante permitirá a criação de uma *relationship class* que implementa a agregação espacial (relação 1:N) dentro de um formato de *file geodatabase*, e a sumarização de valores por edifício. A Figura 3.7 mostra as células individuais das faces (telhado/fachadas) dos edifícios. É após este passo que se criam (manualmente) as relações de agregação espacial, através da criação de uma *relationship class*.

3.2.3 Aplicação de atributos

Uma vez criados os elementos de geometria tridimensional de base, será necessário aplicar atributos. Neste passo faz-se uso das capacidades de um SIG tridimensional. Utilizando por base de informação os pontos tridimensionais resultantes do algoritmo SOL, executa-se uma operação de *spatial join* – junção espacial – entre estes e os elementos de Fachadas. O resultado permite adicionar novos atributos (Rdir, Rdif e Rglobal, correspondendo às radiações *direta*, *difusa* e *global* – a soma das anteriores). A operação de junção espacial é a mais demorada de todo o processo, e aquela em que resultaram mais erros de



Figura 3.8: Edifícios completos, divididos em células, com sobreposição de pontos 3D do algoritmo SOL

informação. Uma vez que a referência espacial não era coincidente numa parte das células calculadas, foi necessário aumentar a tolerância da distância de junção, até um máximo de 3m em XYZ para que as fachadas, à falta de um ponto próximo do seu centróide, assumissem o valor de radiação mais próximo, e previsivelmente, mais realista, tendo em conta que quer as posições, quer as eventuais sombras variam de forma contínua, pelo que se considerou que esta opção não introduz erros significativos na representação do potencial energético, assumindo-se que é respeitada a informação resultante da execução do algoritmo SOL.

A partir deste passo, as células de telhados e fachadas têm atributos individuais, o que permite a consulta a uma escala fina, um dos objetivos principais deste projeto, como é visível na Figura 3.9. Na tabela ilustrada o atributo relevante é o R_{global} , que corresponde à radiação global recebida durante a hora em análise, medida em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m^2). É assim definida uma simbologia (escala de cores) que representa os valores de radiação global recebidos em cada célula do modelo.

3.2.4 Exportação

Entre as razões que presidiram à escolha da atual plataforma conta-se a possibilidade de integração nas ferramentas *web* do ambiente ArcGIS. Assim, é possível exportar diretamente a partir do editor *desktop* para uma instância da plataforma *Portal for ArcGIS* instalada na infraestrutura da FCUL. O último passo do processo é a exportação da cena e correspondentes temas. Neste *software*, uma cena é um conjunto de dados em 3D (mas incluindo camadas 2D) visualizados numa mesma área, equivalente ao conceito de

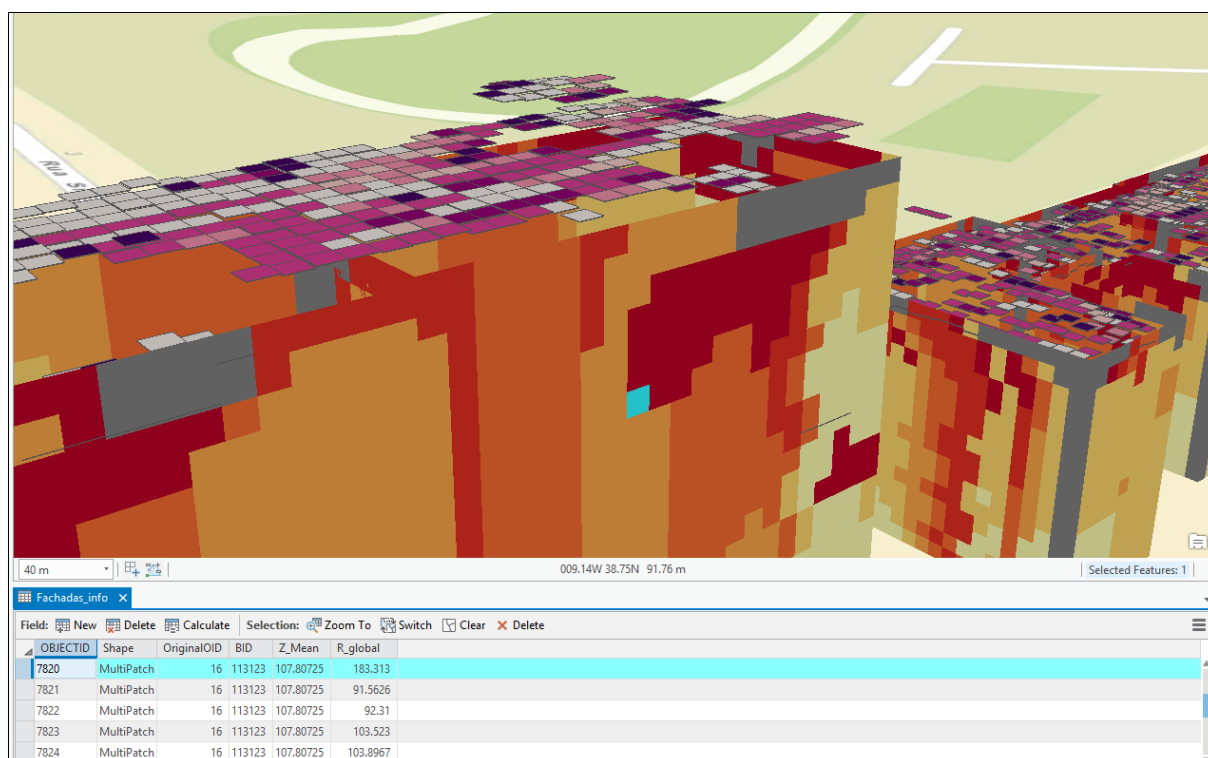


Figura 3.9: Tabela de atributos dos modelos 3D, divididos em células, com valores de radiação individuais

mapa em 2D. É possível a exportação direta dos dados (*upload*) para o serviço *web*, mas também existe a opção de criação de pacotes com dados para posterior incorporação através de um interface *web*.

Assim, foram colocados *online* todos os temas 3D do projeto, e alguns 2D como a telha de radiação sobre os telhados (que é necessariamente projetada sobre o terreno). Note-se que a versão atual da plataforma *Portal for ArcGIS* impõe diversas limitações às características dos temas 3D compartilhados online, incluindo:

- impossibilidade de representar junções (*joins/relates*) em memória;
- indisponibilidade de simbologia de gradação de cores em função de atributo numérico;
- impossibilidade de visualizar mais de 2000 elementos de cada camada em simultâneo.

A limitação de visualização de menos de 2000 elementos obrigou a que nas camadas de células individuais fosse colocada nas suas propriedades uma restrição em SQL para que sejam mostrados apenas os primeiros 2000 elementos (ou *features*) em função da chave primária BID. Outra solução possível seria dividir cada camada em camadas parciais com um máximo de 2000 elementos. Esta restrição prende-se com a infraestrutura da plataforma *web* e a forma como são geradas as *caches* (pré-carregamento) de dados, e prevê-se que possa ser ultrapassada em futuras versões do *software*.

3.2.5 Erros de análise

As operações de junção espacial são muito sensíveis para uma escala tão grande, em que diferenças de alguns centímetros podem ditar a exclusão de um ponto durante a previsão de uma área de pesquisa determinada pelo *software* SIG. No caso presente verificou-se experimentalmente que algumas células de

fachada (planos verticais) poderiam não ter atribuído nenhum valor, daí a tolerância de pesquisa referida anteriormente.

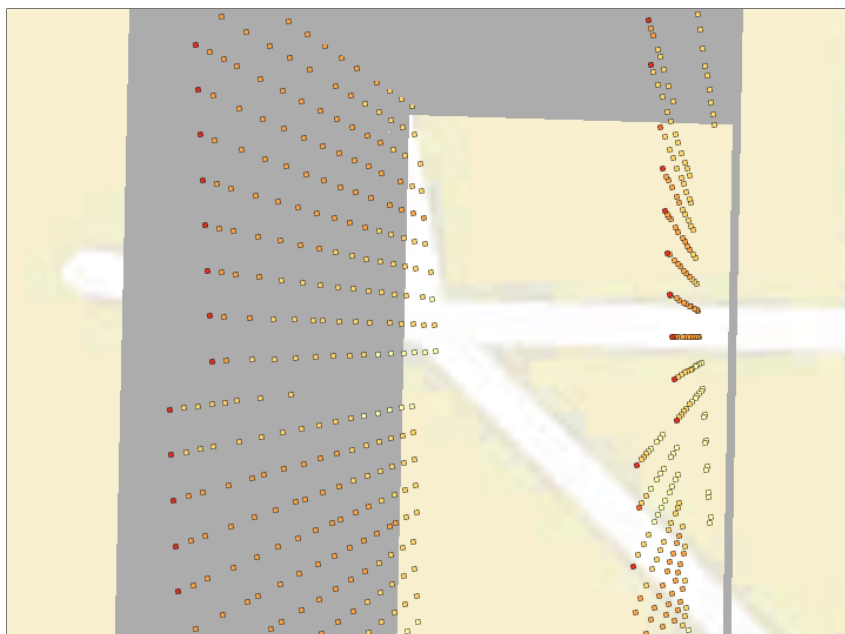


Figura 3.10: Discrepância entre planos dos pontos SOL e dos modelos 3D

A Figura 3.10 mostra como os pontos provenientes do algoritmo SOL formam um plano vertical cuja orientação não coincide exatamente com as fachadas dos modelos gerados em alguns edifícios. Esta diferença resulta do facto de os pontos do SOL serem gerados a partir de um MDS resultante de levantamento aéreo, e os modelos a partir dos polígonos de planta dos edifícios criada pela CML. Os diferentes métodos de criação implicam diferenças de geometria que, não sendo grandes, a esta escala devem ser tidas em conta. No caso da área modelada neste projeto, existem 19567 células de fachada (que, contudo, incluem paredes não expostas – empenas internas mas que estão representadas na camada SIG dos edifícios) e 10379 pontos com valores de radiação. Este aspeto atesta a necessidade de verificação da qualidade dos dados para que o procedimento tenha o menor número de erros (células de valor nulo) possível.

3.3 Visualização e publicação de informação

A plataforma *Portal for ArcGIS* (ESRI, 2016d) permite a visualização de cenas que incluem objetos de geometria 3D a partir dos formatos proprietários ESRI. A integração com o *software desktop* ArcGIS Pro permite a criação e carregamento de cenas *online* a partir do ambiente de edição SIG. Assim, foi criada uma cena (designada por Av_EUA) que incluiu quatro camadas:

- edifícios completos (blocos) – Edifícios;
- telhados, divididos em células – Telhados;
- fachadas, divididas em células – Fachadas;
- terreno, com base em textura correspondente ao MDT – esta camada não foi transposta para o modelo *online* por limitação da plataforma.

Não foram colocados online os produtos intermédios, caso dos pontos 3D resultantes do algoritmo SOL. O objetivo era que a interface web permitisse aceder à mesma informação que está disponível em ambiente desktop. No entanto a plataforma tem algumas limitações (discutidas em 4 *Análise de resultados e alternativas*) que obrigam a algumas adaptações prévias: - os edifícios (blocos) apresentam um valor de sumário para toda a radiação recebida no total das suas faces (fachadas e telhado). Embora este valor seja, *per si*, pouco relevante, presume-se que os eventuais erros de cálculo tenham proporções semelhantes em todos os modelos, pelo que se torna útil na comparação entre edifícios.

A simbologia dos edifícios/células é definida manualmente no editor SIG, já que a plataforma não permite cores graduadas correspondentes a um valor numérico de atributo.

Uma vez criada a cena com as correspondentes camadas, fica então disponível um visualizador de cena, uma página fornecida pelo interface do *Portal for ArcGIS*.



Figura 3.11: Aspeto geral da cena *web* publicada, com os modelos visíveis

A Figura 3.11 mostra o aspeto dos modelos colocados na plataforma *web* com a sobreposição das camadas disponíveis, sendo possível visualizar apenas 2000 elementos de cada uma destas camadas.

A visualização da cena 3D com os respetivos dados geométricos e atributos associados é semelhante àquela em ambiente *desktop*, não havendo, contudo, lugar a manipulação de dados nem possibilidade de criação de filtros (ao contrário do que acontece na versão do visualizador *web* de mapas para 2D). A principal limitação aqui presente é a impossibilidade de pesquisar por atributos nas camadas de uma dada cena. Como forma de minimizar esta limitação, foi adicionada a informação global (na secção 3.2.3 *Aplicação de atributos*) a cada edifício, permitindo a consulta do seu potencial fotovoltaico global.

Capítulo 4

Análise de resultados e alternativas

O procedimento de modelação resulta num modelo 3D simples, que pode ser visualizado em qualquer *browser web* atual sem necessidade de *software* adicional. Neste capítulo discutem-se as limitações da plataforma *web* utilizada e algumas possíveis alternativas de construção de modelos 3D e de visualização de modelos.

4.1 Comportamento de visualização

O visualizador de cena *ArcGIS Online / Portal for ArcGIS* permite a navegação 3D sobre o modelo, nas cotas acima da camada de terreno. Um objeto pode ser selecionado individualmente, tornando visíveis os seus atributos individuais (à semelhança do que acontece no interface do editor visto na secção 3.2.3 *Aplicação de atributos*).

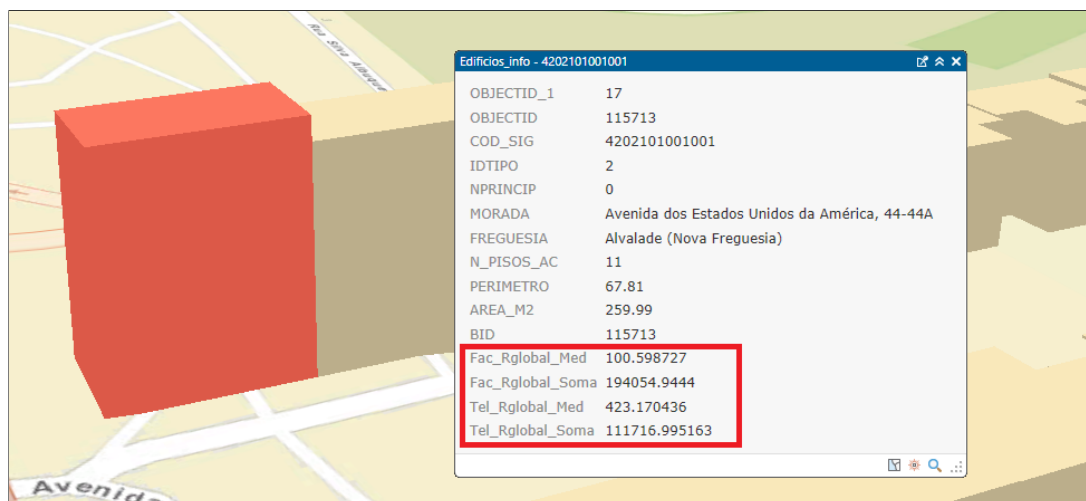


Figura 4.1: Seleção de um edifício (completo) individual com os valores de sumário destacados

Esta página de visualização permite fazer a composição personalizada da cena 3D, selecionando-se as camadas de dados apresentadas ao utilizador, e que podem ser de qualquer tipo de geometria. Note-se que esta plataforma *web* é exclusivamente para visualização, não estando disponível nenhum tipo de interação com os dados (seja de edição ou adição de dados a partir de fontes externas). Assim também não existem ferramentas de análise para o utilizador. Cada elemento individual de uma camada é selecionado individualmente (vide Figura 4.1), nunca em conjunto.

Para além das limitações da plataforma já referidas no capítulo anterior, de que se destaca a impossibilidade de transportar classificações em função de um atributo numérico e a limitação do número de elementos visualizados (que pode ser contornada com a divisão em camadas de dados parciais para um dado tema), a pesquisa dentro do visualizador (Figura 4.2) não permite a procura em função dos atributos dos elementos, estando apenas disponíveis endereços ou outra forma de geocodificação, i.e. permitindo aproximar uma localização e não destacar elementos que cumpram determinado critério. Esta limitação contrasta com as capacidades existentes no visualizador/*web application* disponibilizados pela plataforma online para dados exclusivamente 2D, em que não se recorra a uma cena *web* 3D.

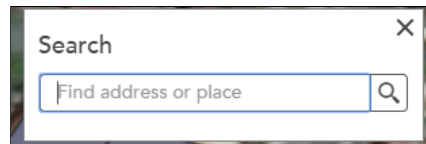


Figura 4.2: Widget/caixa de pesquisa

A integração com outros produtos ESRI permite por exemplo a criação de interfaces de apresentação adicionais, como o caso dos *Story Maps* (ESRI, 2016b), que integram um dado conjunto de dados (2D ou 3D) num formato de apresentação interativo para visualização numa página *web*, podendo ser construídos de forma interativa numa abordagem WYSIWYG, sem necessidade de programação *web*.

A plataforma não permite, no entanto, disponibilizar os mapas carregados *online* como serviços *web* a outros, por exemplo através de um serviço WMS.

4.2 Alternativas

4.2.1 Representação de informação em ambiente *desktop*

3D Fences Toolbox

A *3D Fences Toolbox* (Fraczek and Gerlt, 2016) é uma ferramenta em Python disponibilizada online pela ESRI para o ArcGIS a partir da versão 10.3, sendo executada no editor ArcMap. Esta ferramenta permite a inferência de superfícies contínuas verticais, como é o caso de colunas de água ou planos de corte de solos. A partir de uma descrição em 2D (no plano XY) de uma superfície vertical (designada pela ferramenta como “cerca” – *fence*), e tendo como dados de entrada amostras do fenómeno (a grandeza representada) a analisar, é possível executar uma interpolação que utiliza o algoritmo *Empirical Bayesian Kriging* (EBK) (Krivoruchko, 2012), não parametrizável. A partir destes dados a ferramenta calcula uma superfície que pretende representar o fenómeno em toda a extensão da cerca/cortina, sendo produzida uma nuvem de pontos 3D. Apesar de ser feita para criar pontos em 3D, esta ferramenta não funciona em ArcGIS Pro.

A utilidade desta ferramenta centra-se sobretudo nos casos em que não é possível determinar muitos valores medidos numa dada superfície vertical (não necessariamente um plano), permitindo inferir uma superfície contínua. O facto de produzir uma superfície “contínua” – mais rigorosamente, uma superfície com intervalos de discretização parametrizável, mas sobretudo adequada a grandes extensões – foi aproveitado para testar uma potencial alternativa à metodologia apresentada.

Uma das limitações presentes nos diversos *softwares* SIG atuais mais utilizados é a impossibilidade de representar texturas verticais com valores individuais. As texturas *raster* aplicadas sobre XY permitem,

além de todas as operações e análise espacial, por exemplo simular superfícies 2.5D como é o caso dos MDT. Mesmo quando os SIG têm representações de objetos tridimensionais, a possibilidade de aplicar texturas matriciais às faces não horizontais serve exclusivamente para a visualização, permitindo conferir realismo aos modelos ou aplicar uma determinada simbologia. Como tal, foi explorada a possibilidade da *3D Fences Toolbox* criar uma representação vertical alternativa.

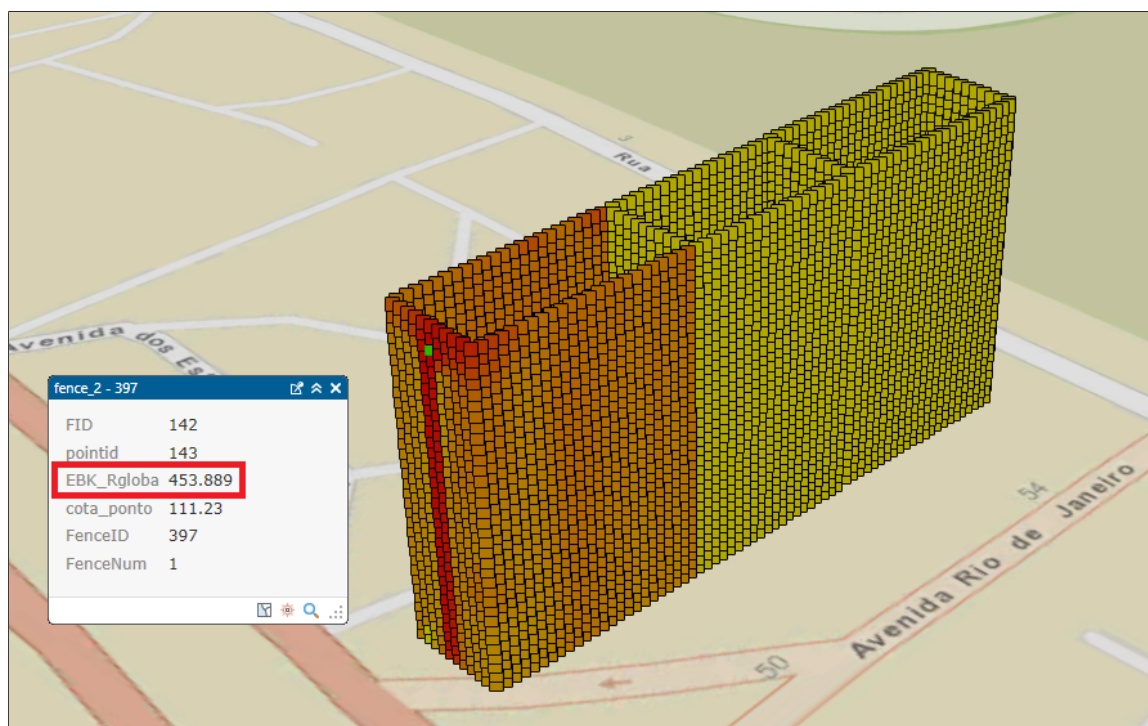


Figura 4.3: Pontos calculados pela *3D Fences Toolbox* visualizados em ArcGIS Pro, com valor de atributo destacado

A ferramenta recebe como dados de entrada (1) uma linha (*polyline*) com a forma (projeção bidimensional no plano horizontal terrestre) da cerca a visualizar e (2) pontos com geometria 3D (XYZ). A distância entre valores nos dados de saída é parametrizável, e o resultado é um ficheiro de pontos tridimensionais. O algoritmo de interpolação é forçosamente o EBK. Como tal, foi testado à distância de 1 m entre pontos, tendo em conta que é esse o nível de detalhe pretendido no projeto. Como dados de entrada utilizaram-se os pontos 3D provenientes do algoritmo SOL.

Executada a ferramenta, e visualizada a superfície (Figura 4.3), em pontos, sobre o projeto em ArcGIS Pro, conclui-se que a nova camada tem exatamente a mesma representação e qualidade de informação (embora fosse possível criar um *output* com distâncias menores entre pontos, tal não seria útil, e adicionaria informação redundante). Além disso, verificou-se experimentalmente que esta ferramenta tem um tempo de execução muito longo e custoso para grandes quantidades de dados de entrada (como foi o caso) já que o seu objetivo é inferir informação para casos em que existem poucas amostras originais. Como tal, conclui-se que a *3D Fences Toolbox*, sendo uma ferramenta útil noutros aspetos ligados à modelação em 3D, não se adequa aos objetivos do projeto.

CityGML

O formato de dados CityGML pode ser utilizado atualmente por diversas ferramentas de modelação 3D, permitindo a interoperabilidade de objetos, ou de ambientes urbanos compostos. No caso de objetos

isolados, existem extensões que oferecem a possibilidade de exportação a partir de editores como o SketchUp, ou de ferramentas de CAD ou de desenvolvimento de BIM. Também em ambiente ArcGIS é possível importar e exportar objetos, mantendo as suas propriedades semânticas, traduzindo-o de CityGML para o modelo de dados proposto pela ESRI para modelos urbanos – *ESRI 3D City Information Model* – que implementa um conjunto de dados integrados (Reitz and Schubiger-Banz, 2014). Esta solução não permite, contudo, *per si* responder aos objetivos iniciais do projeto.

Os elementos de composição de CityGML não permitem uma solução imediata para a individualização de células com valores de radiação. É contudo possível aplicar texturas com uma eventual simbologia de radiação recebida, através da primitiva *texture atlas* que é associada à face de um edifício.

4.2.2 Visualização web

Google Earth

O *software* Google Earth é um visualizador *desktop* que adiciona capacidades ao serviço Google Maps (embora não implemente todas as funções deste) e tem por objetivo permitir a visualização de mais informação geográfica temática, de âmbito habitualmente mais restrito, quando comparado com o serviço de mapas na *web*. Este *software* permite a visualização de formatos de dados espaciais 2D introduzidos pelo utilizador, e até executar algumas operações de SIG básicas. Uma das possibilidades oferecidas é a visualização de modelos tridimensionais, já que o programa é um visualizador nativo de dados 3D, podendo ser utilizado em modo de vista puramente 2D. Estes objetos, gerados externamente, são importados desde que estejam no formato KML, e podem ser representados internamente como uma extrusão em altura de um sólido a partir de um polígono de planta – *base polygon extrusion* – ou como uma série de polígonos pré-definidos (faces) ligados – *multi polygon representation* – que são visualizados no ambiente do *software* (Umit and Zlatanova, 2010). Também estão disponíveis os modelos 3D do serviço *web* da Google para esta plataforma de mapas, criados através de estereorrestituição (Figura 4.4). No entanto, não é possível interagir com estes modelos individualmente, de forma a obter informações de atributos geométricos ou semânticos.



Figura 4.4: Edifícios da área de estudo visualizados em 3D no Google Earth (modelos: Google)

A possibilidade de introduzir modelos próprios no Google Earth, incluindo modelos 3D em formatos de dados como COLLADA, ou integração de mecanismos de automatização que traduzam geometrias CityGML para KML, é útil do ponto de vista da visualização, mas a impossibilidade de os integrar através da sua informação semântica impede que esta plataforma seja, atualmente, utilizada como ferramenta SIG para avaliação de potencial solar de edifícios.

OSM + Mapbox

No que respeita à visualização *web*, existem algumas soluções de visualização 3D aplicadas a ambientes urbanos. A plataforma Mapbox, que permite criar mapas web personalizados com base numa API própria, dispõe de visualização experimental de edifícios em 3D a partir de dados OpenStreetMap (Mapbox, 2016).

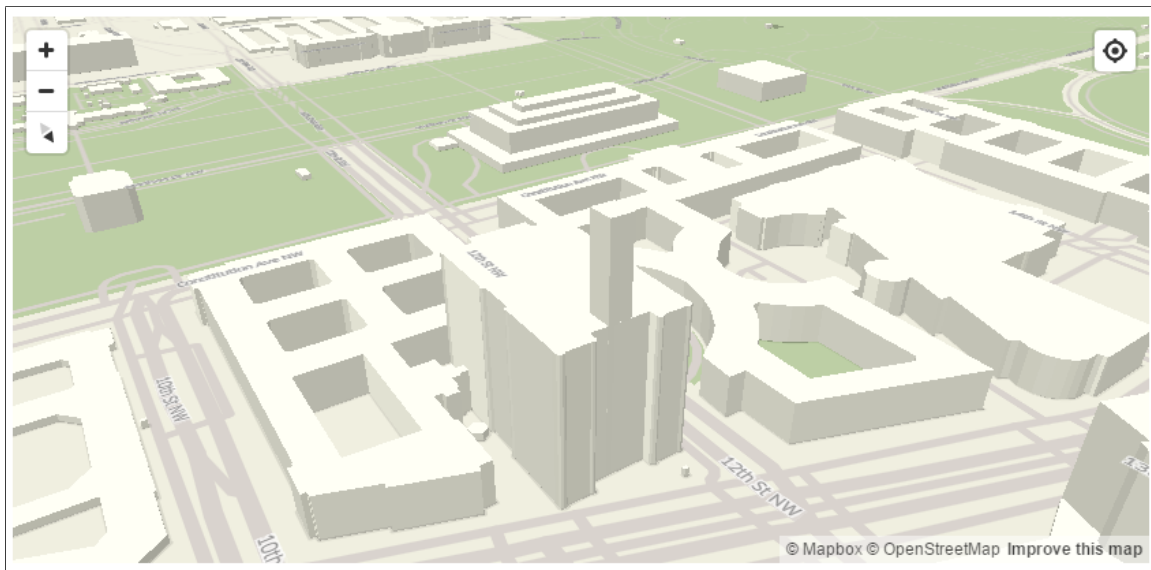


Figura 4.5: Edifícios da plataforma OSM visualizados em 3D num *browser* (Mapbox, 2016)

Esta visualização Figura 4.5, que corre no *browser* recorrendo a Javascript, baseia-se numa transformação em tempo real de polígonos do mapa OSM em sólidos em função do atributo de altura. Assim, presume-se que os dados de base são coerentes no que respeita a esse atributo. Atualmente não são aplicadas texturas aos edifícios, pelo que o aspeto destes é muito simples, correspondendo a um LoD1. Mais relevante é a impossibilidade de detalhar atributos das faces dos sólidos, que não são discretizadas. Note-se que o objetivo desta solução é conferir realismo à simulação e não, para já, permitir adicionar características semânticas.

Capítulo 5

Conclusões

Os modelos 3D são um campo vasto, e de acordo com a aplicação pretendida, existem inúmeras ferramentas e modelos de dados que permitem criar representações e formas de simulação úteis para a disciplina em causa. Esta diversidade é necessariamente positiva pelas diferentes possibilidades que oferece mas tem como reverso a implicação de que qualquer solução criada na interseção de várias áreas de aplicação implica sempre uma solução que integre características de diferentes modelos. No contexto deste trabalho, verificou-se a inexistência de uma solução "chave na mão" no campo dos SIG, embora tenha sido possível criar um modelo de dados simples que responde às necessidades identificadas.

As plataformas de visualização de dados geográficos 2D já praticamente ubíquas no que respeita à maioria das administrações públicas são, além de ferramentas de comunicação e informação ao cidadão, importantes instrumentos de apoio à decisão, e estarão cada vez mais presentes por permitirem avaliar e informar sobre os impactes das transformações no território, particularmente em meio urbano. Ao contrário do que aconteceu noutras áreas, no que respeita à modelação 3D em SIG, o panorama tecnológico atual não é o de um vazio de padronização, embora se note que por ainda não existir um *standard de facto* emergente, deve haver particular cuidado com os modelos de dados utilizados, até para garantir a sua viabilidade futura. Esta preocupação é tanto mais verdadeira quando se tratam de dados públicos.

Este trabalho propôs-se encontrar uma solução para a criação de modelos que incorporassem a informação proveniente do processamento do algoritmo SOL, e em grande medida foi possível concretizar essa solução. Foram identificadas à partida algumas dificuldades, e a arquitetura escolhida para o sistema comporta alguns compromissos em relação ao que é possível representar. No entanto, considera-se que se verifica um avanço no sentido da disponibilização de informação 3D a uma escala muito grande (no caso da implementação seguida, com uma precisão de 1 m²) e que já é possível, com recurso a um *workflow* relativamente contido e facilmente reproduzível, visualizar essa informação *online* sem necessidade de utilizar *software* de SIG.

As limitações encontradas não invalidam a viabilidade da utilização desta metodologia, e espera-se que a evolução futura das ferramentas torne o processo ainda mais simples. A modelação procedimental é uma área em franco desenvolvimento, não apenas na área dos SIG, mas em outras disciplinas como a de produção multimédia (videojogos, etc). A expansão das capacidades neste campo também terá como corolário o desenvolvimento de novas capacidades em SIG, nomeadamente no que respeita à simulação de fenómenos naturais.

5.1 Perspetivas de desenvolvimento

A presente dissertação deve ser analisada numa perspetiva de integração com outros trabalhos, e não como uma solução monolítica para a modelação 3D para informação de potencial solar, já que a interdependência com outros processos e ferramentas poderá aumentar a capacidade de um verdadeiro SIG 3D multidisciplinar. Como tal, numa futura extensão deste trabalho, devem ser objetivos a atingir:

1. a **automatização completa do processo**, para conjuntos de dados que respeitem determinada especificação de entrada (a que aqui se propõe ou outra equivalente) que elimine ou minimize a necessidade de supervisão das operações
2. a possibilidade de **exportação para outras plataformas online** que não dependam de um único produtor de software, mas que antes integrem vários formatos de dados diversos e não um único formato/família de formatos
3. **adaptação da metodologia a outro software SIG** e que não esteja associado às ferramentas específicas do ArcGIS Pro, já que o processo definido é passível de ser reproduzido em qualquer ferramenta de SIG com as necessárias capacidades 3D
4. **implementação do modelo de dados sobre uma infraestrutura de dados espaciais consolidada**, fazendo uso por exemplo da diretiva INSPIRE e com capacidade de acesso concorrente, como o permitido por alguns SGBD, para uma capacidade de alimentação e edição de dados em grande escala não-local
5. reprodução do **modelo para uma área de estudo maior**, caso de uma cidade ou região, na linha do que são os objetivos iniciais deste projeto, mas que dependerá da produção de dados (nomeadamente levantamento LiDAR aéreo) necessários ao processamento da informação sobre radiação solar
6. a **criação de mapas de potencial solar fotovoltaico sobre o parque construído** que sejam derivados dos modelos 3D criados e permitam quantificar a ordem de grandeza do potencial de determinada área numa cidade, como instrumento de apoio à decisão
7. prever a **possibilidade de integração dos modelos gerados com modelos detalhados** ($LoD \geq 2$) para um ambiente de simulação urbana completo

Há que considerar que os objetivos 2. e 3. são contingentes ao desenvolvimento de *software* que permita a reprodução das capacidades utilizadas no decorrer deste trabalho e que são atualmente o maior obstáculo à utilização de alternativas. Ainda que o atual ambiente – proprietário – permita um processo de produção e exportação relativamente simples, considera-se legítimo um compromisso que adicionasse alguma eventual complexidade ao processo, mas possibilitasse em troca a utilização de múltiplas plataformas *web* de interação com os dados; no entanto os modelos de dados alternativos (e.g.: CityGML) hoje disponíveis dificilmente permitiriam implementar uma das características diferenciadoras deste projeto – a individualização de células que permitem um detalhe elevado da granularidade da análise de informação.

Bibliografia

- Apollonio, F. I., Gaiani, M., and Benedetti, B. (2012). 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: A framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. *J. Archaeol. Sci.*, 39(5):1271–1287. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.034>.
- Autoridade Tributária e Aduaneira (2016). Código do Imposto Municipal sobre Imóveis. Available from: https://info.portaldasfinancas.gov.pt/pt/informacao{_}fiscal/codigos{_}tributarios/CIMI/index{_}cimi.htm.
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadersh. Manag. Eng.*, 11(Bazjanac 2006):241–252.
- Batty, M., Chapman, D., Evans, S., Haklay, M., Kueppers, S., Shiode, N., Smith, A., and Torrens, P. (2001). Visualizing the City: Communicating Urban Design to Planners and Decision-Makers. *Plan. Support Syst.*, (15):405–433. Available from: <http://discovery.ucl.ac.uk/158113/>.
- Batty, M., Hudson-Smith, A., Milton, R., and Crooks, A. (2010). Map mashups, Web 2.0 and the GIS revolution. *Ann. GIS*, 16(1):1–13.
- BBC (2013). Who, what, why: How does a skyscraper melt a car? Available from: <http://www.bbc.com/news/magazine-23944679>.
- Besuiievsky, G. and Patow, G. (2014). Recent advances on LoD for procedural urban models. *Proc. 2014 Work.*, pages 1–10. Available from: <http://rs.tudelft.nl/{~}rlindenbergh/workshop/BesuiievskyIQmulus.pdf>.
- Biljecki, F., Ledoux, H., and Stoter, J. (2016a). *An improved LOD specification for 3D building models*, volume 59.
- Biljecki, F., Ledoux, H., and Stoter, J. (2016b). Does a finer level of detail of a 3D city model bring an improvement for estimating shadows? *Adv. 3D Geoinf.*, pages 1–15.
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., and Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS Int. J. Geo-Information*, 4(4):2842–2889. Available from: <http://www.mdpi.com/2220-9964/4/4/2842>.
- Borges, K. A. V., Davis, C. A., and Laender, A. H. F. (2001). OMT-G: An object-oriented data model for geographic applications. *Geoinformatica*, 5(3):221–260.

- Botica, N., Martins, M., Ribeiro, M., and Magalhães, F. (2015). 3D representation of the urban evolution of Braga using the cityengine tool. pages 132–143. Available from: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/39670>.
- Bremer, M., Mayr, A., Wichmann, V., Schmidtner, K., and Rutzinger, M. (2016). A new multi-scale 3D-GIS-approach for the assessment and dissemination of solar income of digital city models. *Comput. Environ. Urban Syst.*, 57:144–154. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.007>.
- BuildingSMART (2012). IFC4 Official Release. Available from: <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/>.
- Caragliu, A., Del Bo, C., and Nijkamp, P. (2011). Smart Cities in Europe. *J. Urban Technol.*, 18(2):65–82. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80051636492&partnerID=tZ0tx3y1>.
- Catita, C., Redweik, P., Pereira, J., and Brito, M. C. (2014). Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Comput. Geosci.*, 66:1–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.002>.
- Cheng, J., Deng, Y., and Du, Q. (2013). Mapping Between BIM Models and 3D GIS City Models of Different Levels of Detail. *13th Int. Conf. Constr. Appl. Virtual Real.*, (October):502 – 514.
- Comissão Europeia (2007). INSPIRE - Infrastructure for spatial information in Europe. Available from: <http://inspire.ec.europa.eu/>.
- Diário da República (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.º 80/2006. *Diário da República - I Série - A - n.º 67*, pages 46(2468–2513).
- Dodge, M., Doyle, S., Smith, A., and Fleetwood, S. (2011). Towards the Virtual City : VR & Internet GIS for Urban Planning. In *Virtual Real. Geogr. Inf. Syst. Birkbeck Coll. 22nd May 1998.*, number May 1998, pages 1–9.
- Döllner, J., Baumann, K., and Buchholz, H. (2006). Virtual 3D City Models as Foundation of Complex Urban Information Spaces. *11th Int. Conf. Urban Plan. Spat. Dev. Inf. Soc.*, 2(11):107–112. Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.83.4098&rep=rep1&type=pdf>.
- Eastman, C., Liston, K., Sacks, R., and Liston, K. (2008). *BIM Handbook*.
- El-Mekawy, M., Östman, A., and Hijazi, I. (2012). A Unified Building Model for 3D Urban GIS. *ISPRS Int. J. Geo-Information*, 1(2):120–145.
- ESRI (1998). ESRI Shapefile Technical Description. Available from: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>.
- ESRI (2012). Esri CityEngine. Available from: <http://www.esri.com/software/cityengine>.
- ESRI (2015). Introduction to sharing web layers. Available from: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/sharing/overview/introduction-to-sharing-web-layers.htm>.

- ESRI (2016a). ArcGIS Pro: Tasks. Available from: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/tasks/whatistask.htm>.
- ESRI (2016b). ArcGIS Story Maps. Available from: <https://storymaps.arcgis.com/en/>.
- ESRI (2016c). CGA Shape Grammar Reference. Available from: <https://esri.github.io/esri-cityengine-sdk/html/cgaref/cgareference/cgaindex.html>.
- ESRI (2016d). Portal for ArcGIS. Available from: <http://server.arcgis.com/en/portal/>.
- Fraczek, W. and Gerlt, B. (2016). Transforming 3D data into fences and curtains with Geostatistical Tools. *ESRI*, pages 8–11.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., and Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review.
- Google (2016). Google Earth. Available from: <https://www.google.com/earth/>.
- Gröger, G., Kolbe, T., Nagel, C., and Häfele, K.-H. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard. *Ogc*, pages 1 – 344. Available from: https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_{_}id=47842.
- Gröger, G. and Plümer, L. (2011). How to achieve consistency for 3D city models. *Geoinformatica*, 15(1):137–165.
- Gröger, G. and Plümer, L. (2012). CityGML - Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 71:12–33.
- Hofierka, J. and Kaňuk, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renew. Energy*, 34(10):2206–2214.
- Huld, T., Suri, M., Kenny, R., and Dunlop, E. (2005). Estimating PV performance over large geographical regions. *31st IEEE PVSC*, 0(January):1679–1682. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1488470>.
- Kemec, S., Zlatanova, S., and Duzgun, H. S. (2010). A Framework for Defining a 3D Model in Support of Risk Management. *Geogr. Inf. Cartogr. Risk Cris. Manag.*, pages 69–82. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03442-8_{_}5.
- Khuan, C. T., Abdul-Rahman, A., and Zlatanova, S. (2008). 3D solids and their management in DBMS. *Lect. Notes Geoinf. Cartogr.*, pages 279–311.
- Krivoruchko, K. (2012). Empirical Bayesian Kriging. *ESRI Press*, Fall 2012:6–10.
- Liang, J., Gong, J., Zhou, J., Ibrahim, A. N., and Li, M. (2015). An open-source 3D solar radiation model integrated with a 3D Geographic Information System. *Environ. Model. Softw.*, 64:94–101.
- Lisboa E-Nova (2012). Carta do Potencial Solar do Concelho de Lisboa. Available from: <http://lisboaenova.org/cartasolarlisboa>.

- Maguire, D. (1991). An overview and definition of GIS. Available from: <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/~nbb/ccm/downloads/Literatura/OVERVIEWANDDEFINITIONOFGIS.pdf>.
- Mapbox (2016). Mapping 3D building features in OpenStreetMap. Available from: <https://www.mapbox.com/blog/mapping-3d-buildings/>.
- Martinović, A. (2015). *Inverse Procedural Modeling of Buildings*. PhD thesis.
- Müller, P., Vereenoghe, T., Ulmer, A., and Van Gool, L. (2005). Automatic reconstruction of Roman housing architecture. *Rec. Model. Vis. Cult. Herit.*, pages 287–298.
- Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., and Van Gool, L. (2006). Procedural modeling of buildings. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):614.
- Open Geospatial Consortium (2016). OpenGIS® Geography Markup Language Encoding Standard (GML). Available from: <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>.
- OpenStreetMap (2016). OSM-3D.org. Available from: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/OSM-3D.org>.
- Over, M., Schilling, A., Neubauer, S., and Zipf, A. (2010). Generating web-based 3D City Models from OpenStreetMap: The current situation in Germany. *Comput. Environ. Urban Syst.*, 34(6):496–507. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.05.001>.
- Parlamento Europeu (2009). Directiva 2009/28/Ce. *J. Of. da União Eur.*, 2008(2):16–62.
- Projeto Cidade e Espectáculo (2010). Cidade e Espectáculo: uma visão da Lisboa pré-terramoto. Available from: <https://lisbon-pre-1755-earthquake.org>.
- Raper, J. F. and Maguire, D. J. (1992). Design models and functionality in GIS. *Comput. Geosci.*, 18(4):387–394. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0098300492900672>.
- Redweik, P., Catita, C., and Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Sol. Energy*, 97:332–341.
- Reitz, T. and Schubiger-Banz, S. (2014). The Esri 3D city information model. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 18:012172. Available from: <http://stacks.iop.org/1755-1315/18/i=1/a=012172?key=crossref.a16f70421b2875adf1bdcc1dc706d2ce>.
- Scianna, A., Ammoscato, A., and Corsale, R. (2008). Chapter 9 The Third Dimension – Part IV A STEP TOWARD INTEROPERABILITY : MANAGING 3D URBAN DATA WITH GML. In *UDMS Conf. Aalborg, Denmark*, number October, pages 9119–9126.
- Smelik, R. M., Tutenel, T., Bidarra, R., and Benes, B. (2014). A survey on procedural modelling for virtual worlds. *Comput. Graph. Forum*, 33(6):31–50.
- Stiny, G. (1980). Introduction to shape and shape grammars. *Environ. Plan. B*, 7(3):343–351. Available from: <http://goo.gl/9GsWe2>.

- Stoter, J., Reuvers, M., Vosselman, G., Goos, J., van Berlo, L., Zlatanova, S., Verbree, E., and Klooster, R. (2010). Towards a 3D Geo-Information Standard in the Netherlands. *Archives*, XXXVIII:63–67.
- The Guardian (2013). Walkie Talkie architect 'didn't realise it was going to be so hot'. Available from: <https://www.theguardian.com/artanddesign/2013/sep/06/walkie-talkie-architect-predicted-reflection-sun-rays>.
- Tsiliakou, E., Labropoulos, T., and Dimopoulou, E. (2014). Procedural Modeling in 3D GIS Environment. *Int. J. 3-D Inf. Model.*, 3(3):17–34.
- Umit, I. and Zlatanova, S. (2010). Interactive modelling of buildings in Google Earth: A 3D tool for Urban Planning. In Neutens, T. and Maeyer, P., editors, *Dev. 3D Geo-Information Sci.*, pages 52–70.
- UNFCCC. Conference of the Parties (COP) (2015). Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. *Paris Clim. Chang. Conf. - Novemb. 2015, COP 21*, 21932(December):32. Available from: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
- Venugopal, M., Eastman, C. M., Sacks, R., and Teizer, J. (2012). Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema. *Adv. Eng. Informatics*, 26(2):411–428.
- Wate, P. and Coors, V. (2015). 3D Data Models for Urban Energy Simulation. *Energy Procedia*, 78(0):3372–3377. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215024856>.
- Xu, W., Zhu, Q., Du, Z., and Zhang, Y. (2010). Design and implementation of 3D model database for general-purpose 3D GIS. *Geo-Spatial Inf. Sci.*, 13(3):210–215.
- Zhang, X., Lv, Y., Tian, J., and Pan, Y. (2015). An integrative approach for solar energy potential estimation through 3D modeling of buildings and trees. *Can. J. Remote Sens.*, 41(2):126–134.
- Zlatanova, S., Rahman, A., and Pilouk, M. (2002). Trends in 3D GIS development. *J. Geospatial ...*, 4(2):71–80.

Apêndice A

Anexos

A.1 Código-fonte das regras CGA

A.1.1 facades.cga

```
/**
 * File:    facades.cga
 * Created: 11 Dec 2014 09:54:14 GMT
 * Author:  pvcity
 */

version "2015.2"

attr Altura = 0

@StartRule
@Out (granularity = separatedShapes)
@InPolygon

Shape -->
extrude(world.y, -Altura) Building // Extrude shape downwards from lot shape

Building -->
comp(f){side: Fac} // then divide model into façades

Fac -->
split(y){~1: Floor}* // ...split façades into floors (spaced 1 m)

Floor -->
split(x){~1: Unit}* // and floors into units (spaced 1 m).
```

A.1.2 buildings.cga

```
/**
 * File:    buildings.cga
 * Created: 19 Aug 2016 18:56:02 GMT
 * Author:  pvcity
 */

version "2015.2"

attr Altura = 0

@StartRule
@InPolygon

Shape -->
extrude(world.y, -Altura) Building // Extrude shape downwards from lot shape
```

A.1.3 roofs.cga

```
/**
 * File:    roofs.cga
 * Created: 13 Jul 2016 15:29:44 GMT
 * Author:  pvcity
 */

version "2015.2"

attr Altura = 0

@StartRule
@Out (granularity = separatedShapes) // allow individual
// features in GIS environment
@InPolygon

Shape -->
extrude(world.y, -Altura) Building // Extrude shape downwards from lot shape
```

```

Building -->
comp(f){bottom: Roof} // then select "bottom" (world: top) face of the model





Roof -->
split(x){~1: Rx}* // divide the roof face by x-axis (spaced 1m)

Rx -->
split(y){~1: Ry}* // and then divide each split by y-axis (spaced 1m)

```

A.1.4 Anexos digitais

Ficheiros binários embutidos no documento. **Nota: podem não ser acessíveis em todos os leitores de PDF.**

Descrição	Ficheiro
Ficheiro (binário) com a tarefa que inclui os passos de execução, válida em ArcGIS Pro [versão 1.3.1, 2016]	 task3D.esriTasks
Pacote (ficheiro binário) de regra de geração de edifícios, válido em ArcGIS Pro [versão 1.3.1, 2016]	 buildings.rpk
Pacote (ficheiro binário) de regra de geração de fachadas, válido em ArcGIS Pro [versão 1.3.1, 2016]	 facades.rpk
Pacote (ficheiro binário) de regra de geração de telhados, válido em ArcGIS Pro [versão 1.3.1, 2016]	 roofs.rpk